

Tagesgang und Komponenten der Abkühlungsgröße

Verkürzte Fassung der
Inauguraldissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Basel

von

Charlotte Henneberger

aus Basel und Guggisberg (Kt. Bern)



Wien
Springer-Verlag

1950

Tagesgang und Komponenten der Abkühlungsgröße

Verkürzte Fassung der
Inauguraldissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Basel

von

Charlotte Henneberger

aus Basel und Guggisberg (Kt. Bern)



Wien
Springer-Verlag
1950

Genehmigt von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät auf
Antrag der

Herren P. D. Dr. W. MÖRIKOFER und Prof. Dr. P. GÖTZ

Basel, den 27. April 1948

Prof. Dr. M. FIERZ
Dekan

Fräulein CHARLOTTE HENNEBERGER wurde von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Basel am 19. Januar 1949 erlaubt, diese verkürzte Fassung ihrer am 27. April 1948 genehmigten Inauguraldissertation drucken zu lassen. Die vollinhaltliche Arbeit mit dem Titel:

Tagesgang und Komponenten der Abkühlungsgröße

kann eingesehen oder entliehen werden:

1. in der Universitätsbibliothek Basel;
2. in der Schweizerischen Landesbibliothek in Bern.
3. im Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos.

Separatdruck aus

Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie,
Serie B, Allgemeine und biologische Klimatologie
Band II, Heft 1—2, Seite 86—119, Jahrgang 1950



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung, Summary, Résumé	
Einleitung.....	86
I. Instrumentarium und Beobachtungsmaterial.....	88
1. Abkühlungsgröße.....	88
2. Übrige Elemente.....	90
3. Aufstellung der Registrierinstrumente.....	91
II. Die Komponenten der Abkühlungsgröße.....	91
1. Theoretische Grundlagen für die Berechnung der Komponenten der Abkühlungsgröße.....	91
a) Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung.....	91
b) Kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel.....	92
c) Wärmeverlust durch Leitung und Konvektion.....	93
d) Wärmeentzug durch Niederschlag.....	93
e) Zusammenfassende Formel.....	94
2. Zahlenmäßige Bestimmung des Einflusses der einzelnen meteoro- logischen Faktoren.....	95
a) Lufttemperatur.....	96
b) Kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel.....	96
c) Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung.....	96
d) Windgeschwindigkeit.....	97
e) Luftfeuchtigkeit und Niederschlag.....	99
3. Formel zur Berechnung der Abkühlungsgröße.....	100
III. Der Tagesgang der Abkühlungsgröße.....	101
1. Der mittlere Tagesgang der Abkühlungsgröße.....	101
2. Der Tagesgang der Abkühlungsgröße in Abhängigkeit von der Witterung.....	105
a) Auswahl der Tage einheitlicher Witterung.....	105
b) Der Tagesgang der Abkühlungsgröße an Strahlungstagen...	106
c) Der Tagesgang der Abkühlungsgröße an bedeckten Tagen...	110
3. Die Abkühlungsgröße während des Krankentages.....	114
a) Monatsmittel der Abkühlungsgröße während des Krankentages	114
b) Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte der Abkühlungsgröße während des Krankentages.....	115
Zusammenfassung.....	117
Literatur.....	119

Curriculum vitae

Am 17. Juli 1922 wurde ich, CHARLOTTE HENNEBERGER, in Basel geboren, als Tochter des MORITZ HENNEBERGER Dr. phil. II von Basel und Guggisberg (Bern) und der EMMA HENNEBERGER, geborene RICKLI. Ich absolvierte von 1929—1941 die Primarschule und anschließend das Mädchengymnasium in Basel und bestand im Frühjahr 1941 die kantonale Maturitätsprüfung der Realabteilung. Hierauf begann ich an der Universität Basel das Studium an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät. Ich belegte die Fächer Physik, Geographie, Mathematik, Astronomie und später Meteorologie bei den Herren Professoren ANNAHEIM, BUCHNER, BUXTORF, FIERZ, HAGENBACH, HUBER, JAEGER, MATTHIES, MIESCHER, MÖRIKOFER, NIETHAMMER, OSTROWSKI, VON DER PAHLEN, SPIESS, VOSSELER, WEHRLI und ZICKENDRAHT. Der Besuch der Vorlesungen wurde stets ergänzt durch Absolvierung von Praktika, Übungen und Exkursionen.

Mit Erlaubnis von Herrn Prof. Dr. TH. NIETHAMMER, dem damaligen Vorsteher der Astronomisch-Meteorologischen Anstalt, durfte ich beim Assistenten Dr. M. BIDER regelmäßig abgehaltene Übungen in Meteorologie besuchen. In den meisten Semesterferien zwischen 1943 und Winter 1947/48 arbeitete ich als wissenschaftliche Assistentin am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos unter dessen Vorsteher P. D. Dr. W. MÖRIKOFER. Ich wirkte dort vom Frühling 1944 bis Herbst 1945 während dreier Semester ohne Unterbruch; durch die Mitwirkung am laufenden Dienst des Observatoriums wurde mir eine gründliche praktische Ausbildung und durch die Bearbeitung verschiedener Sonderprobleme eine Einführung in viele Fragen der Meteorologie und Klimatologie zuteil.

Die Grundlagen zur vorliegenden Dissertation wurden mir ebenfalls am Observatorium Davos gegeben; die Arbeit entstand unter der Anleitung von Herrn P. D. Dr. W. MÖRIKOFER.

Allen meinen verehrten Lehrern danke ich bestens für die wohlwollende Förderung, die sie mir während meiner Studien haben angedeihen lassen.

551.524.31 : 551.586.11 (494)

(Aus dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos, Direktor:
Privatdozent Dr. W. MÖRIKOFER.)

Tagesgang und Komponenten der Abkühlungsgröße.

Von

Charlotte Henneberger.

Mit 7 Textabbildungen.

Zusammenfassung. Siehe Abschnitt IV, S. 117.

Summary. The problem of numerical relations between the cooling power and its influencing meteorological factors is examined from results of hourly records of the cooling power, carried out at Davos with the Davos frigorimeter. A comprehensive formula for all factors affecting the cooling power is developed; its constants could be determined from the recorded results, in so far as they cannot be concluded from theoretical considerations. On the other hand the properties of the diurnal variation of the cooling power have been derived from the records and examined both for the climatological average as well as for clear and overcast days. A computation of frequencies for the hours of the patient's day completes the characterization of the cooling power at Davos.

Résumé. Sur la base des valeurs horaires du pouvoir réfrigérant obtenues à Davos à l'aide d'un enregistrement du frigorimètre de Davos, l'auteur examine tout d'abord les relations numériques existant entre le pouvoir réfrigérant et les facteurs météorologiques entrant en considération. Il établit une formule générale précisant l'effet de tous ces facteurs; les constantes qu'elle renferme, pour autant qu'elles ne sont pas connues par des considérations théoriques, sont déterminées grâce aux valeurs observées elles-mêmes. D'autre part on a calculé les lois de variation diurne du pouvoir réfrigérant, aussi bien en moyenne que pour les jours sereins et couverts. L'exposé contient enfin des tableaux de fréquences du pouvoir réfrigérant relatives aux heures du jour utiles pour les malades.

Einleitung.

Die neuere, mehr medizinisch orientierte Entwicklung der Klimatologie hat gezeigt, daß die Bedeutung der Wärmefaktoren in ihrer Auswirkung auf biologische Vorgänge und speziell auf das Kälte-

gefühl des Menschen durch die Berücksichtigung der Lufttemperatur allein nicht erfaßt werden kann. Aus diesem Grunde wurde durch bioklimatisch interessierte Forscher der Begriff der Abkühlungsgröße (= AG) geschaffen, mit dem die Gesamtheit der auf einen Probekörper abkühlend bzw. aufwärmend wirkenden meteorologischen Faktoren erfaßt wird. Zur Messung der AG sind verschiedene Instrumente im Gebrauch; von diesen soll hier nur das Davoser Frigorimeter von DORNO und THILENIUS [1, 2] erörtert werden, das sich am besten zur Beobachtung und Registrierung der Mittelwerte der AG im Freien eignet.

Da das beträchtliche Vergleichsmaterial zur Klimatologie der AG (vgl. z. B. W. MÖRIKOFER [3]) fast ausschließlich auf dreimal täglichen Einzelablesungen beruht und dadurch nur die Mittelwerte der AG für den Vormittag, den Nachmittag und die Nacht getrennt zu bestimmen gestattet, sollen nun in der vorliegenden Arbeit die Stundenwerte der AG auf Grund vierjähriger Registrierungen in Davos eine systematische Untersuchung finden.

Eine Bearbeitung von Werten der AG kann nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen: Die klimatologische Verarbeitung dient dazu, ein anschauliches Bild von den durchschnittlichen Klimaverhältnissen der AG und ihren Unterschieden bei verschiedener Witterung zu gewinnen. Die physikalisch-analytische Verarbeitung untersucht dagegen, in welcher Weise die einzelnen meteorologischen Elemente größenordnungsmässig in den komplexen Begriff der AG eingehen; zu diesem Zweck ist es wichtig, das Frigorimeter und die zum Vergleich benützten Apparate unter den natürlichen Bedingungen im Freien zu exponieren, da Laboratoriumsversuche unter normierten Bedingungen vor sich gehen und deshalb die natürlichen Verhältnisse nie genau wiedergeben können. Gegenüber den bisherigen Untersuchungen hat nun die vorliegende Bearbeitung den Vorzug, daß erstmals Stunden- und nicht nur Tageszeitenmittel zur Verfügung stehen, wodurch eine weitergehende Analyse ermöglicht wird. Die Einflüsse der einzelnen meteorologischen Elemente auf die AG lassen sich an Hand von Stundenwerten viel genauer untersuchen, da man annehmen kann, daß innerhalb einer Stunde die Mittelwerte von AG, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Strahlungsvorgängen und Niederschlag viel eher homogen sein dürften als bei einer Mittelung über mehrere Stunden.

Auch für die klimatologische Fragestellung bedeutet dieses Registriermaterial einen entscheidenden Fortschritt, indem daran der Tagesgang der AG sehr viel genauer studiert werden kann als an den Terminmitteln. Es lassen sich auch Spezialfragen der Bioklimatologie wie etwa die AG während des Krankentages leicht gesondert behandeln.

Dem Vorsteher des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos, Herrn Privatdozent Dr. W. MÖRIKOFER, bin ich zu besonderem Dank verpflichtet für die Anregung zur Bearbeitung dieses Themas sowie für seine stets wohlwollende Förderung und Unterstützung meiner

Arbeit. Manche Ratschläge verdanke ich auch Herrn Dr. H. WIERZEJEWSKI, Assistent am Davoser Observatorium, der sich mit zahlreichen konstruktiven Verbesserungen des Frigorimeters befaßt hat¹.

I. Instrumentarium und Beobachtungsmaterial.

1. Abkühlungsgröße.

Das Davoser Frigorimeter [1, 2] hat im Modell 1931 einen ersten Abschluß seiner Entwicklung gefunden. In den letzten Jahren wurden verschiedene konstruktive Einzelheiten des Frigorimeters durch Dr. H. WIERZEJEWSKI [20] am Davoser Observatorium abgeändert, um die Arbeitsweise des Instruments zuverlässiger zu gestalten; doch wurde dabei darauf gesehen, daß das Arbeitsprinzip des Instruments keine Veränderung erfuhr, so daß die Ergebnisse älterer Modelle mit denen des jetzigen Modells vergleichbar sind, soweit dabei gleiche Temperatur verwendet wurde.

Das Davoser Frigorimeter beruht im Prinzip auf der Messung der Heizenergie, die einer den klimatischen Einflüssen frei ausgesetzten geschwärzten Kupferkugel von 7,5 cm Durchmesser zugeführt werden muß, um ihre Temperatur dauernd auf 36,5° C zu halten. Zu diesem Zwecke ist die massive Kupferkugel im Innern mit einer vom elektrischen Netzstrom gespeisten Heizwicklung versehen; die Aufrechterhaltung der konstanten Temperatur erfolgt mit Hilfe eines in die Kugelmitte reichenden Schaltthermometers, wofür zeitweise Quecksilberkontaktthermometer, zeitweise Bimetallwendeln verwendet wurden.

Das Prinzip der durch Oxydation geschwärzten, elektrisch geheizten Kupferkugel sowie ihre Montierung wurden auch beim neuen Modell unverändert beibehalten. Die Umstellung der Bezugstemperatur von 33° C, entsprechend einem mittleren Wert der variablen Hauttemperatur, auf die Bluttemperatur von 36,5° C ist schon in den Anfängen kontinuierlicher Beobachtungsreihen (meist 1929/30) vorgenommen worden.

Der elektrische Schaltkreis des Frigorimeters wurde in dem Sinne umgebaut und verbessert, daß die Schaltthermometer eine geringere Beanspruchung durch das dauernde Ein- und Ausschalten erfahren. Die Uhr zur Summierung der Heizzeiten ist seit mehr als zehn Jahren durch einen Wattstundenzähler ersetzt, wodurch nicht mehr die Dauer der Heizung, sondern unmittelbar die Heizenergie erfaßt wird. Dadurch ist der quadratisch eingehende Fehler, der früher durch Schwankungen der Netzspannung verursacht werden konnte, vollkommen behoben.

Die AG, der durch die Energie des Heizstromes kompensierte Wärmeverlust der Frigorimeterkugel, wird ausgedrückt in $\text{mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Doch ist es klar, daß die mit dem Frigorimeter oder auch mit einem

¹ Die vorliegende Veröffentlichung stellt eine verkürzte Fassung einer 1948 bei der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Basel eingereichten Dissertation dar; die ausführliche Fassung kann bei der Universitätsbibliothek Basel, bei der Schweizerischen Landesbibliothek in Bern und beim Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos eingesehen werden.

anderen Instrument gemessene physikalische AG nicht ein Maß darstellen kann für die Wärmeproduktion oder die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers. Während bei zunehmender klimatischer Abkühlung die Wärmeabgabe des Frigorimeters anwächst, tritt beim menschlichen Körper durch den Vorgang der Wärmeregulation im Gegenteil eine Einschränkung der Wärmeabgabe ein; dabei hält der Mensch seine Hauttemperatur nicht konstant, sondern paßt sie den Klimabedingungen einigermaßen an. Ein physikalisches Instrument mit konstanter Oberflächentemperatur ist deshalb nicht geeignet, den Wärmehaushalt des menschlichen Organismus naturgetreu wiederzugeben. Doch stellt die AG, wie sie mit dem Frigorimeter gemessen wird, ein Maß für die Anforderungen dar, die von den Klimafaktoren an das Wärmeregulationsvermögen des Organismus gestellt werden.

Es ist üblich, täglich zu drei Terminen (z. B. um $7\frac{1}{2}$ oder 8, um 12 oder $13\frac{1}{2}$ und um 18 oder $21\frac{1}{2}$ Uhr), eventuell auch nur morgens und abends den Stand des Heizenergieverbrauches des Frigorimeters abzulesen und daraus die in der Zwischenzeit benötigte Heizenergie zu bestimmen. Infolgedessen erhält man aus diesen drei täglichen Ablesungen nicht etwa drei Momentanwerte der AG, sondern drei, den Zwischenzeiten zwischen den Ablesungen entsprechende Mittelwerte der AG für Vormittag, Nachmittag und Nacht. Wenn auch dieses Verfahren für klimatologische Vergleiche im allgemeinen durchaus genügt, so treten doch Fragestellungen auf, bei denen eine Bestimmung der AG über kürzere Zeiten als die vielstündigen Intervalle wünschenswert erscheint. Dies ist besonders der Fall, wenn es sich darum handelt, den Tagesgang der AG zu untersuchen; aber auch eine Analyse des Einflusses der einzelnen meteorologischen Faktoren auf die AG führt zu um so sichereren Resultaten, je konstanter die Werte der Elemente sind, was eben der Fall ist, wenn diese nur über kurze Zeiten gemittelt werden müssen.

Aus diesem Grunde sind schon mehrfach Versuche unternommen worden, mit dem Frigorimeter Registriergeräte zu kombinieren, die eine feinere Analyse des Ablaufs der AG ermöglichen, so von H. GOLDSCHMIDT [4], H. LUNELUND [5], R. FAUST [6] und H. LETTAU [7, 8]. Doch haben diese Bemühungen, wie auch frühere Versuche am Davoser Observatorium, nicht durchwegs zu befriedigenden Ergebnissen geführt. Erst die Kombination des Frigorimeters mit einem registrierenden Wattstundenzähler hoher Empfindlichkeit (Type „Maxigraph“ der Firma Landis & Gyr) zur Aufzeichnung der Stundenwerte hat eine einwandfreie Lösung der Aufgabe ermöglicht; das Verfahren gestattet die Bestimmung von Stundenmitteln der AG mit einer Genauigkeit von $0,1 \text{ mecal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$.

Wie schon ausgeführt, ist es — vor allem im Hinblick auf die Möglichkeit von Änderungen der Kugeltemperatur — notwendig, die Homogenität der Meßreihen von Frigorimeteruntersuchungen sorgfältig zu prüfen. Zu diesem Zweck stand uns Vergleichsmaterial verschiedener anderer Schweizer Stationen zur Verfügung; sodann wird in Davos außer am Observatorium auch an der amtlichen meteorologischen Station auf dem Dach des Kurvereinsgebäudes seit 1930 mit einem Frigorimeter die AG gemessen. Zudem waren am Observatorium außer dem registrierenden Frigorimeter häufig noch weitere Frigorimeter im Probetrieb. Zum Zweck einer solchen Homogenitätsprüfung wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Meßreihen durch Bildung

der Quotienten zwischen den Monatsmitteln der zu untersuchenden Station und möglichst vieler Vergleichsstationen untersucht, wobei der klimatisch bedingte Jahresgang der Quotienten zuerst eliminiert werden muß.

Bei dieser Prüfung ergab sich, daß zwar das registrierende Frigorimeter wegen Schwankungen der Kugeltemperatur nicht während der ganzen Untersuchungsperiode homogene Werte geliefert hat, daß sich jedoch die ganze Reihe mit Hilfe hinreichend genauer Reduktionsfaktoren auf einheitliche Empfindlichkeit und gleichzeitig auf das unveränderte Frigorimeter der Kurvereinbarung umrechnen ließ. Dadurch wurde die ganze Registrierreihe von Februar 1941 bis Mai 1946 (mit Ausnahme der zwei Perioden Februar 1942 bis Februar 1943 und März bis Mai 1944) homogen gemacht; zum Ersatz für die ausfallenden Monate wurde die Beobachtungsreihe bis Mai 1946 verlängert, so daß für jeden Monat des Jahres vier Monate zur Verfügung standen. Für die nachfolgende Untersuchung wurde das homogene Registriermaterial folgender Monate verwendet:

Februar 1941	bis	Januar 1942,
März 1943	„	Februar 1944,
Juni 1944	„	Mai 1946.

2. Übrige Elemente.

Für die Analyse des Einflusses der einzelnen meteorologischen Elemente auf die AG wurden die Aufzeichnungen folgender Registrierapparate verwendet:

a) *Lufttemperatur*: Stundenwerte nach einem Thermohygrographen Fuess mit Wochenumlauf, aufgestellt in Jalousiehütte; dreimal tägliche Bestimmung der Thermographkorrektur mittels Aspirationspsychrometers. Genauigkeit der Stundenwerte $\pm 0,5^\circ$.

b) *Einstrahlung von Sonne und Himmel*: Stundensummen der globalen Einstrahlung von Sonne und Himmel und der diffusen Himmelsstrahlung auf Horizontalfläche mittels zweier Solarigraphen Moll-Gorczynski und Sechsfarben-Schlagbügelgalvanometers Hartmann & Braun. Beide Solarigraphen sind genau gleich konstruiert, nur wird bei dem einen die direkte Sonnenstrahlung durch einen kleinen ovalen Schirm von 6 bis 7 cm Durchmesser abgehalten, der in einem Abstand von zirka 40 cm vom Empfänger mittels Uhrwerks der Sonne nachgeführt wird. Für die Anwendung dieser Strahlungswerte auf die AG sind drei Umrechnungen zu berücksichtigen:

1. Umrechnung der direkten und der diffusen Strahlung von Horizontalfläche auf Kugeloberfläche;

2. Verschiebung der Strahlungswerte von wahrer Sonnenzeit auf MEZ;

3. Umrechnung der Strahlungsenergie von $\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ auf $\text{meal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$.

c) *Windgeschwindigkeit*: Stundenmittel nach Universalanemograph Fuess in m/s.

d) *Niederschlag*: Stundensummen des Niederschlags nach Pluviograph Hellmann, bei tiefen Temperaturen mit elektrischer Heizung zur Messung des Schneefalles; bei Heizung fällt erfahrungsgemäß die Menge des Niederschlages etwas zu niedrig aus. Für unsere Untersuchung über die Abhängigkeit der AG vom Niederschlag wurden nur diejenigen Niederschlagsstunden ausgewählt, in denen der Niederschlag während der ganzen Stunde mit ungefähr gleicher Intensität fiel.

3. Aufstellung der Registrierinstrumente.

Zum Vergleich der Werte der AG mit denjenigen der einzelnen meteorologischen Elemente ist es wichtig, daß die Apparate nicht zu weit voneinander entfernt und möglichst gleichartig aufgestellt sind. Am Davoser Observatorium ist für die hier in Frage kommenden Elemente diese Bedingung nach bester Möglichkeit erfüllt. Mit Ausnahme des Pluviographen, der mehr im Windschutz auf einem ein Stockwerk tiefer gelegenen Flachdach eines Anbaues aufgestellt ist, befinden sich alle Instrumente auf dem flachen Beobachtungsdach des Observatoriums. Die Frigorimeter stehen auf einem graugestrichenen Holztisch über der nordöstlichen Ecke des Hauses, zirka 1,0 m über Dachboden und zirka 1600 m ü. M., in 5 m Abstand davon die Solarigraphen. Der Thermograph war während der Dauer der hier besprochenen Untersuchung in einer nach Norden offenen Jalousiehütte auf der Nordseite des Hauses untergebracht, in 10 m Abstand vom Frigorimeter. Das Schalenkreuz des Anemographen ist zirka 4,8 m über der Mitte des Daches auf einer kleinen Hütte montiert. Das Bedenken, daß die mit diesem Anemographen registrierte Windgeschwindigkeit nicht vergleichbar sein könnte mit den Windverhältnissen, denen das Frigorimeter ausgesetzt ist, wird durch die Ergebnisse systematischer Vergleichsversuche zerstreut, wobei sich gezeigt hat, daß die Differenzen der Windgeschwindigkeiten zwischen den beiden Aufstellungen gelegentlich Zehntel m/s betragen können, sich im Durchschnitt jedoch aufheben.

II. Die Komponenten der Abkühlungsgröße.

Die Abkühlung der frei aufgestellten Frigorimeterkugel wird beeinflusst durch verschiedene meteorologische Elemente, nämlich Strahlung, Lufttemperatur, Luftbewegung und Niederschlag. Von verschiedenen Forschern ist schon versucht worden, die Abhängigkeit der AG von diesen Faktoren formelmäßig darzustellen; doch konnte diese Aufgabe nicht immer für alle Einflüsse mit hinreichender Genauigkeit gelöst werden. Es soll deshalb im nachfolgenden erneut versucht werden, die Auswirkung der einzelnen Faktoren auf die Stundenwerte der AG theoretisch zu untersuchen (Abschnitt II, 1) und sie durch Formeln mit empirisch bestimmten Konstanten wiederzugeben (Abschnitt II, 2). Diese Faktoren sind:

- a) Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung des Frigorimeters.
- b) Kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel.
- c) Wärmeverluste durch Leitung und Konvektion als Funktion von Lufttemperatur und Luftbewegung.
- d) Wärmeverluste durch Niederschlag.

1. Theoretische Grundlagen für die Berechnung der Komponenten der Abkühlungsgröße.

- a) Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung.

Es besteht stets ein Strahlungsaustausch zwischen der auf $36,5^{\circ}$ aufgeheizten Frigorimeterkugel und ihrer Umgebung, der sich nach dem

Stefan-Boltzmannschen Gesetz aus den Temperaturen und den Strahlungszahlen beider berechnet. Es läßt sich in unserem Fall die nachfolgende Formel anwenden, die für den langwelligen Strahlungsaustausch zweier Körper gilt, von denen der eine vom andern vollständig eingeschlossen wird; dabei wird bei der Anwendung auf das Frigorimeter der innere Körper durch die Frigorimeterkugel, der umhüllende durch ihre gesamte Umgebung dargestellt. Die effektive Ausstrahlung der Frigorimeterkugel ist dann gegeben durch die Formel:

$$S' = \frac{F_1 \cdot \sigma_s}{\frac{1}{k_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{k_2} - 1 \right)} (T_1^4 - T_2^4). \quad (1)$$

Hierin bedeutet: S' die Energie der effektiven Ausstrahlung, also den Wärmeverlust, den die Kugel im langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung (einschließlich des Erdbodens) erfährt; σ_s die Stefan-Boltzmannsche Konstante, hier ausgedrückt in $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{grad}^{-4}$; F die Oberfläche; T die absolute Temperatur; k die Absorptionszahl für langwellige Strahlung; Index 1 bezogen auf die Frigorimeterkugel, Index 2 auf die Umgebung.

Die Formel gilt streng genommen nur für eine Umgebung von einheitlicher Temperatur T_2 (vgl. auch S. 96). Daher kann sie beim Frigorimeter eine strenge Anwendung nur finden im Fall von einheitlicher tiefer Wolkendecke, nicht aber bei klarem Himmel, wo die Ausstrahlung nach Richtungen verschiedener Temperatur, gegen die Atmosphäre sogar in spektraler Abhängigkeit erfolgt.

Dadurch, daß für den vorliegenden Fall einer weit entfernten Umgebung der Quotient aus den beiden Flächen praktisch Null ist, vereinfacht sich der Ausdruck (1) (vgl. [6], [9], [10]) zu:

$$\frac{S'}{F_1} = S = k_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (1a)$$

Für den Fall, daß $\frac{F_1}{F_2}$ nicht notwendig 0 wird (so wenn Nebel das Frigorimeter umgibt), kann trotzdem Formel (1a) Anwendung finden, weil dann k_2 annähernd $= k_s = 1$ ist. Die Gleichung (1a) wird am häufigsten in der Form (1b) benützt

$$S = \alpha_s \cdot \Theta, \quad (1b)$$

wo $\alpha_s = k_1 \cdot \sigma_s \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$ und $\Theta = T_1 - T_2$. α_s nennt man dann die Wärmeübergangszahl durch langwellige Strahlung. Der Ausdruck $\frac{T_1^4 - T_2^4}{\Theta}$ kann mit guter Annäherung durch $4 \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3 = 4 T^3$ ersetzt werden.

b) Kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel.

Die kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel bedeutet einen Wärmegegewinn für das Frigorimeter, der den Wärmeverlusten entgegen-

steht. Da für die vorliegende Untersuchung über die AG nach Stunden-summen ausgewertete Registrierungen zweier Solarigraphen Moll-Gorczynski zur Verfügung stehen, von denen einer die Globalstrahlung von Sonne und Himmel, der andere (durch ständige Abschattung der Sonne) die Himmelsstrahlung auf Horizontalfläche aufzeichnet, so soll hier der Warmegewinn des Frigorimeters aus den registrierten Werten der Strahlung auf Horizontalfläche berechnet werden. Es lauten dann die Formeln für die von der Kugelfläche aufgenommene Einstrahlung:

$$I = \frac{k_2 \cdot I' \cdot \pi r^2}{\sin h \cdot O} \quad (2) \quad \text{für die direkte Sonnenstrahlung}$$

$$H = \frac{k_2 \cdot H' \cdot 2 \pi r^2}{O} \quad (3) \quad \text{für die diffuse Himmelsstrahlung, die bei eindeutigen Verhältnissen als winkelunabhängig angenommen werden kann.}$$

Diese Formeln sind ähnlich schon von LINKE [11] und LEHMANN [9] aufgestellt worden. Darin sind I' und H' die entsprechenden Intensitäten auf horizontale Fläche, ebenfalls gemessen in $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$;

k_2 = Absorptionszahl des Frigorimeters für Sonnen- bzw. Himmelsstrahlung,

h = Sonnenhöhe,

r = Radius der Frigorimeterkugel in cm,

O = Oberfläche der Frigorimeterkugel in cm^2 .

c) Wärmeverlust durch Leitung und Konvektion.

Der Wärmeverlust L durch Leitung und Konvektion ist nach dem Newtonschen Abkühlungsgesetz proportional zur Temperaturdifferenz der Kugel gegenüber ihrer Umgebung.

$$L = \alpha_L (T_k - T_u) = \alpha_L \Theta. \quad (4)$$

α_L = Wärmeübergangszahl für Leitung und Konvektion, wird von einzelnen Autoren auch als spezifische AG bezeichnet,

T_k = 309,5 ist die absolute Temperatur der Kugel,

T_u = Temperatur der Umgebung,

Θ = $T_k - T_u$, oder $\vartheta_k - \vartheta_u$ die Übertemperatur der Kugel gegenüber der Umgebung.

ϑ = Temperatur in Grad Celsius.

d) Wärmeentzug durch Niederschlag.

Wird die Kugeloberfläche durch Niederschlag befeuchtet, so vergrößert sich die Abkühlung um ein weiteres additives Glied V , das den Wärmeentzug durch Verdampfung dieses Niederschlags wiedergibt. Dieser Betrag V kann für Regen näherungsweise berechnet werden aus der Formel

$$V = \frac{h \cdot M'}{O \cdot \tau} [(T_K - T_L) \cdot c_w + r]. \quad (5a)$$

Hierin ist h der Verdampfungsquotient, der angibt, welcher Anteil der auf die Kugel auftreffenden Niederschlagsmenge M' (in g) nicht abtropft oder wegspritzt, sondern verdampft wird; h kann zwischen 0 und 1 variieren, für geringe Niederschläge wird es 1, während es für intensive Regenfälle abnimmt. Die auf den Kugelquerschnitt auftreffende Niederschlagsmenge M' ist bei senkrechtem Einfall des Niederschlags gleich der auf die horizontale Auffangfläche eines Regenmessers von der Öffnung des Kugelquerschnitts auffallenden Niederschlagsmenge M ; bei schrägem Einfall des Niederschlags wird sie jedoch größer im Verhältnis $M' = M/\cos \alpha$, wo α die Abweichung der Einfallsrichtung von der Vertikalen bedeutet. Die Größe $h \cdot M'$ ist daher die Niederschlagsmenge, die mit Hilfe der dem Frigorimeter entzogenen Wärmemenge verdampft wird. Ferner bedeuten:

r = Verdampfungswärme (mcal g⁻¹) des Niederschlags von der Temperatur T_k ;

$T_K - T_L$ = Erwärmung des Regens von der Temperatur T_L auf T_K ; mangels genauerer Voraussetzungen ist die Temperatur des Regens gleich der Temperatur T_L der Luft gesetzt, wobei ein kleiner Fehler neben der großen Verdampfungswärme nicht in Betracht fällt.

c_w = spezifische Wärme von Wasser (= 1,0);

O = Kugeloberfläche in cm²;

τ = Zeit in sec.

Fällt der Niederschlag in Form von Schnee, so vergrößert sich der Klammerausdruck der Formel (5a) um zwei weitere Summanden, von denen der eine der Erwärmung des Schnees von Schnee- respektive Lufttemperatur auf 0° C, der andere der Schmelzwärme entspricht:

$$V = \frac{h \cdot M'}{O \cdot \tau} [(273 - T_L) w + s + (T_k - 273) \cdot c_w + r] \quad (5b)$$

w = spezifische Wärme von Eis,

s = Schmelzwärme von Eis.

e) Zusammenfassende Formel.

Zusammenfassend läßt sich die Abkühlung, die die frei aufgestellte Frigorimeterkugel durch die klimatischen Einflüsse erfährt, in der Form darstellen:

$$A = S - (I + H) + L + V. \quad (6)$$

Während die Summanden I , H und S sich auf Grund der Theorie aus Messungen anderer Elemente berechnen lassen, gehen in L und V Größen ein, die nur empirisch festgestellt werden können. L hängt von einer Reihe von Einflüssen ab, am stärksten vom Wind, weshalb es meist dargestellt wird in der Form

$$\alpha_L = \frac{L}{\Theta} = a + b v^m, \quad (7)$$

wo v = Strömungsgeschwindigkeit der Luft in m/s.

Bei völliger Luftruhe ($v = 0$) bleibt nur das erste Glied a von α_L übrig. Es entspricht dem Wärmeübergang bei freier Strömung, d. h. durch die natürliche Konvektion. Bei Hinzukommen von erzwungener Strömung durch den Wind ($v > 0$) wird die Wärmeübergangszahl um das Glied $b v^m$ vergrößert.

Aus der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung [12] und [13] ergibt sich, daß sich a als Funktion der Grashoffschen Kennzahl Gr und $b v^m$ als Funktion der Reynoldsschen Kennzahl Re darstellen lassen; es ist dann

$$a = f_1(Gr) = f_1\left(\frac{l_0^3 \varrho^2 g \beta (T_k - T_u)}{\mu^3}\right), \quad (8a)$$

$$b v^m = f_2(Re) = f_2\left(\frac{\varrho l_0 v}{\mu}\right). \quad (8b)$$

Die Größen a und b sind also im Prinzip selbst noch von verschiedenen Parametern abhängig, nämlich von der Dichte $\varrho = f(p)$, der inneren Reibung μ , der Wärmeleitzahl λ und der thermischen Volumenausdehnung β des umgebenden Mediums, in diesem Falle also der Luft, sowie von einer charakteristischen Länge l_0 , als welche beim Frigorimeter der Kugeldurchmesser zu nehmen ist; g ist die Schwerebeschleunigung.

Die genaue Form dieser Funktionen f_1 und f_2 interessiert hier nicht weiter; es genügt die Feststellung, daß die Größen a und b immerhin praktisch nahezu konstant sind. Diese Konstanten a , b und m sind für das frei aufgestellte Frigorimeter schon von verschiedenen Autoren [14], [5], [10], [15] experimentell bestimmt worden. Sie lassen sich auch aus unserem Material berechnen (vgl. u. S. 97 ff.), das den besonderen Vorzug aufweist, daß die Zusammenhänge an Stundenmitteln und nicht an Termin- oder Tagesmitteln studiert werden können, so daß daraus eine Erweiterung der bisherigen Untersuchungen ermöglicht wird.

2. Zahlenmäßige Bestimmung des Einflusses der einzelnen meteorologischen Faktoren.

Um in dem komplexen Begriff der AG den Einfluß der einzelnen meteorologischen Elemente festlegen zu können, müssen Bedingungen gesucht werden, unter denen bis auf diesen einen Faktor alle übrigen bekannt oder wenigstens konstant sind. Die Einwirkungen des Windes und des Niederschlags auf die Abkühlung der Frigorimeterkugel gehen aus der Theorie allein noch nicht mit genügender Eindeutigkeit hervor, da über den Verdampfungsquotienten für Niederschlag zu wenig bekannt ist, und auch die Abkühlung durch Wind nur für Spezialfälle durch Ähnlichkeitsbetrachtungen abgeklärt werden konnte [12, 13]. So scheint es denn von besonderem Interesse, vor allem diese beiden Teilprobleme an unserem Beobachtungsmaterial genauer zu studieren; doch soll zu diesem Zwecke zuerst berichtet werden, in welcher Weise der Einfluß der übrigen Faktoren erfaßt werden kann.

a) Lufttemperatur.

Aus der Theorie kann geschlossen werden, daß die AG praktisch eine lineare Funktion der Übertemperatur Θ der Kugel über Luft sein wird, was auch durch die Analyse des Beobachtungsmaterials bestätigt wird.

$$A - S + (I + H) = \alpha_L \cdot \Theta \quad (6a, 4)$$

Der Anteil a in α_L nach Formel (7) ist zwar nach Formel (8a) auch von der Übertemperatur abhängig, jedoch nur in geringem Maße, so daß α_L als praktisch unabhängig von der Übertemperatur angesehen werden kann.

b) Kurzwellige Einstrahlung von Sonne und Himmel.

Der Einfluß der kurzwelligen Einstrahlung auf die AG kann mit hinreichender Genauigkeit, wenigstens für bestimmte ausgewählte Wetterlagen, aus den theoretischen Ableitungen entnommen werden. In die Formeln (2) und (3) werden für I' und H' die vom Solarigraphen Moll-Gorczynski registrierten Stundenmittel eingesetzt. Eine Schwierigkeit besteht dabei lediglich in der oft nicht genügend sicheren Kenntnis der Absorptionszahl der Frigorimeterkugel für sichtbare Strahlung. Für die vorliegende Untersuchung konnte ich mich auf Bestimmungen durch H. ROOSE stützen (unveröffentlichtes Manuskript), die er 1937 an vier Frigorimeterkugeln des Observatoriums Davos durchgeführt hatte. Er fand dabei ein Absorptionsvermögen von durchschnittlich 80%; mit hinreichender Sicherheit kann daher für unsere im Dauerbetrieb stehenden Kugeln $k_2 = 0,80$ angenommen werden.

c) Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung.

Schwierigere Probleme stellte die Bestimmung des langwelligen Strahlungsaustausches. Daß dieser nicht unterschätzt werden darf, zeigten schon die ersten Überschlagsrechnungen. Die Werte der langwelligen Ausstrahlung S erreichen im Mittel $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der gesamten AG und dürfen deshalb nicht vernachlässigt werden. In der dafür geltenden Formel

$$S = k_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_k^4 - T_u^4) \quad (1a)$$

kann die Absorptionszahl k_1 auch für langwellige Strahlung nach den Untersuchungen von ROOSE ebenfalls zu 0,80 angenommen werden. Für σ_s wurde nach [16] der Wert $1,37_8 \cdot 10^{-9} \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ grad}^{-4}$ benützt.

Die effektive Temperatur T_u der Umgebung der Frigorimeterkugel kann nur für gewisse Bedingungen bestimmt werden; eine einheitlich geschlossene, tiefe Wolkendecke bildet mit der bodennahen Umgebung des Frigorimeters einen umhüllenden Körper, für den in der Strahlungsaustauschformel im Mittel als Temperatur der Umgebung mit genügender Sicherheit die Lufttemperatur eingesetzt werden kann, da kein Strahlungsverlust nach dem Weltraum besteht. Viel unsicherer wird eine Schätzung der Umgebungstemperatur im Falle von heiterem Himmel. Die wolkenlose Atmosphäre ist wegen der selektiven Wasserdampfabsorption für gewisse Wellenlängenbereiche vollkommen durchlässig, für andere wieder-

um kommt sie einem schwarzen Körper gleich. BÜTNER [17] definiert für diesen Fall durch die Strahlungsaustauschformel [s. o. (1a)] eine mittlere Umgebungstemperatur T_2 und gibt an, daß dieselbe um 10 bis 20° niedriger ist als Lufttemperatur. Dadurch soll die Wirkung der effektiven Ausstrahlung ersetzt werden durch die Annahme einer niedrigen Umgebungstemperatur, die denselben Abkühlungseffekt hätte. Diese Erniedrigung ist in erster Linie abhängig von Bewölkung und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, die deshalb im Strahlungshaushalt der AG eine wesentliche Rolle spielen.

Während diese Voraussetzungen zur Berechnung der effektiven Ausstrahlung des Frigorimeters gegen wolkenlosen Himmel nicht genügend bekannt sind, kann umgekehrt aus unserem Material aus der gemessenen Ausstrahlung auf die effektive Umgebungstemperatur geschlossen werden. Danach¹ ergibt sich für klare Nächte eine mittlere Umgebungstemperatur, die im Winter 5 bis 10° niedriger, im Sommer angenähert gleich der Lufttemperatur in Bodennähe ist.

d) Windgeschwindigkeit.

Für bedeckte Tage und Nächte, für welche die Ausstrahlung wegen einheitlicher Umgebungstemperatur berechnet und die Einstrahlung der Solarigraphenregistrierung entnommen werden kann, sind außer L alle Glieder der Gleichung (6a) bekannt und es kann somit für niederschlagsfreie Stunden L berechnet werden:

$$L = \alpha_L \cdot \Theta = A - S + (I + H).$$

Die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl α_L von der Windgeschwindigkeit wird hier ausschließlich aus den Beobachtungen an bedeckten Tagen und Nächten gewonnen.

In Abb. 1 sind die Werte der Wärmeübergangszahl α_L in $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{grad}^{-1}$ als Funktion der mittleren Windgeschwindigkeit in m/s eingetragen, und zwar gemittelt über gleiche Windgeschwindigkeiten, jedoch getrennt für Tage und Nächte. Die Punktreihe läßt sich, nachdem sie nach der Formel $\frac{a + 2b + c}{4}$ ausgeglichen worden ist, durch eine Gerade annähern, die der Gleichung

$$\alpha_L = 0,145 + 0,117 v$$

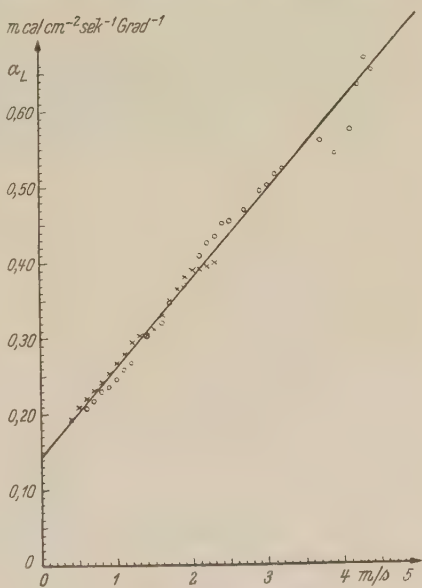


Abb. 1. α_L als Funktion der Windgeschwindigkeit; $\times$ bedeckte Nächte; $\circ$ bedeckte Tage.

¹ Vgl. Anmerkung S. 88.

genügt. Sie darf jedoch nicht über $v = 5$ m/sec hinaus verlängert werden, da über diese Grenze hinaus keine Meßpunkte vorliegen. Nach Formel (7) wäre eine Potenzfunktion zu erwarten. Ein Abbiegen der Geraden in ihrem oberen Teil würde mit Abb. 1 nicht in Widerspruch stehen, erscheint jedoch bei der nach oben zunehmenden Streuung nicht unbedingt gesichert. Der mittlere Fehler von α_L als Funktion der Windgeschwindigkeit beträgt in bedeckten Nächten durchschnittlich 7%, an bedeckten Tagen 10%.

Entsprechende Ergebnisse anderer Autoren vergleichen wir am besten an Hand der graphischen Zusammenstellung von BÜTTNER [13]. Zu diesem Zwecke sind in Abb. 2 die durchwegs auf Laboratoriumsuntersuchungen beruhenden Endergebnisse von BÜTTNER, in der der Einfluß

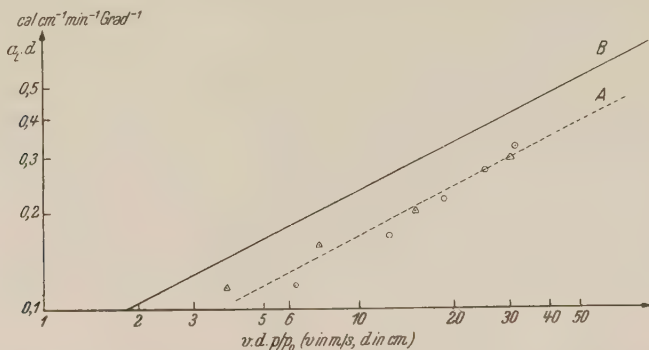


Abb. 2. Windabhängigkeit des Wärmeüberganges für Leitung und Konvektion an Kugeln.

B Mittelkurve nach BÜTTNER [13]; $\triangle$ Werte nach BIDER [15] und LAHMEYER [18];

$\circ$ nach vorliegender Untersuchung; A Mittelwerte von $\triangle$ und $\circ$.

des Ausstrahlungsgliedes bereits berücksichtigt ist, durch die Gerade B im doppelt-logarithmischen System als Funktion der Windgeschwindigkeit wiedergegeben, wobei infolge Verwendung verschiedener Hilfsgrößen eine andere Bezeichnung der Koordinaten als in Abb. 1 benützt wird. Außerdem sind als Dreiecke die Resultate der Bestimmungen von BIDER [15] und LAHMEYER [18] sowie mit Ringen die Ergebnisse unserer Untersuchung eingetragen. Dabei zeigt sich, daß die von BIDER, LAHMEYER und uns im Freien für α_L gefundenen Resultate ganz bedeutend kleiner sind als die von BÜTTNER. Legen wir trotz dem Umstand, daß die von verschiedenen Autoren gefundene Windabhängigkeit teils durch eine lineare Funktion, teils durch eine Potenzfunktion wiedergegeben wird, zur Orientierung eine mittlere Gerade A durch die Ergebnisse von BIDER, LAHMEYER und uns, so verläuft diese nahezu parallel zu der Mittelkurve von BÜTTNER. Es ergibt sich daraus, daß die im Laboratorium vor dem Ventilator oder im Windkanal bestimmten und von BÜTTNER benützten Werte der Wärmeübertragungszahl α_L systematisch um ca. 30% höher sind als die mit frei exponierten Frigorimetern gemessenen. Auf Grund der lokalen Vergleichen der Windgeschwindigkeit können wir annehmen,

daß dieser Unterschied nicht einer unrichtigen Bestimmung der Windgeschwindigkeit, sondern eher einer Verschiedenheit des Turbulenzgrades durch ungleiche Exposition zuzuschreiben ist.

e) Luftfeuchtigkeit und Niederschlag.

Praktisch ist es für die Abkühlung der Frigorimeterkugel nicht von Wichtigkeit, ob die Luft trocken oder feucht ist; denn die Wärmeleitzahl, die im Wärmehaushalt des Frigorimeters eine Rolle spielt, ist für feuchte Luft ganz ähnlich wie für trockene.

Hinsichtlich des Einflusses des Niederschlags auf die AG läßt sich aus der Theorie erkennen, daß in die Gleichungen (5a) und (5b) nur der

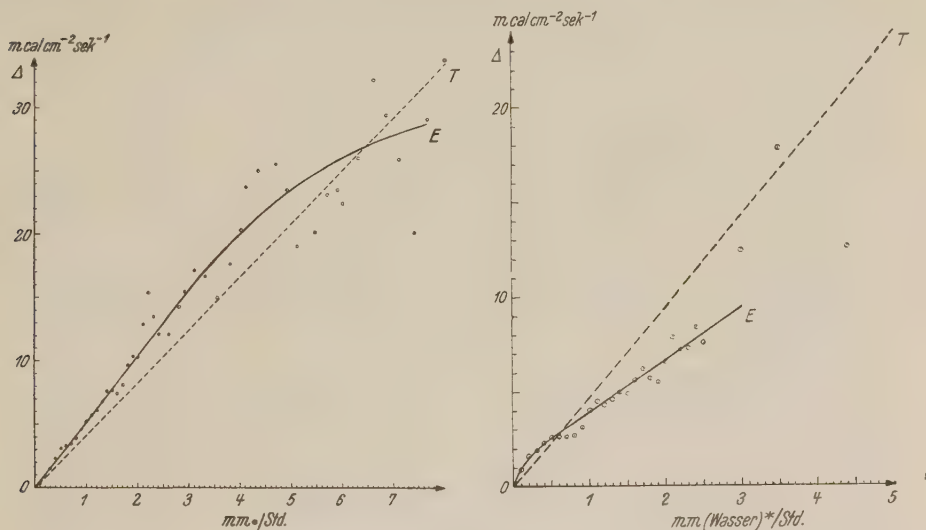


Abb. 3. Differenz der Abkühlungsgröße:

a) mit und ohne Regen;

b) mit und ohne Schneefall.

E empirisch gefundene Kurve; T theoretisch berechnete Gerade.

Verdampfungsquotient h als Variable eingeht. Um den Wärmeentzug durch Verdampfen von Niederschlag zu berechnen, vergleicht man die bei Niederschlag registrierte AG mit den für gleiche Temperatur- und Windverhältnisse nach der empirisch aufgestellten Formel (II, 2d) berechneten Werten. Um auf ganz eindeutigen Niederschlagsverhältnissen aufzubauen, wurden den Niederschlagsregistrierungen des Observatoriums nur diejenigen Stunden entnommen, in denen nach der Registrierung des Pluviographen die Niederschlagsintensität über das ganze Stundenintervall praktisch konstant war.

Die nach Niederschlagsintensitäten gemittelten Differenzen der AG mit und ohne Niederschlag sind in Abb. 3 für Regen bzw. Schneefall als Funktion der stündlichen Niederschlagsmenge M auf Horizontal-

fläche aufgetragen; trotz der beträchtlichen Streuung der Punkte läßt sich eine recht eindeutige Kurve (E) in jeder Figur festlegen. Die für die Verdampfung des Niederschlages erforderliche Verdampfungswärme wächst bis zu beträchtlichen Stundensummen des Niederschlags (4 bis 5 mm/Std) angenähert proportional mit der Niederschlagsintensität, nimmt jedoch bei intensiveren Regenfällen nur noch schwach zu. Zum Vergleich damit kann man auch theoretisch die Wärmemenge angenähert berechnen (Gleichung 5a und 5b), die der Frigorimeterkugel entzogen wird, wenn aller aufgefallene Niederschlag zum Verdunsten gebracht wird ($h = 1$); diese Werte sind in den Abb. 3a und 3b durch die Geraden T wiedergegeben.

Aus dem Vergleich der empirisch bestimmten und der aus der Theorie berechneten Kurve Abb. 3a ist ersichtlich, daß bei geringen und mittleren Regenintensitäten dem Frigorimeter etwas mehr Wärme entzogen wird, als nach den Berechnungen zu erwarten ist. Der Unterschied rührt her von der ungleichen Stellung der Auffangfläche von Pluviograph und Frigorimeterkugel zur Einfallsrichtung des Regens. Während der Querschnitt der Kugel für alle Einfallsrichtungen gleich bleibt, nimmt die Ausbeute an Regen für eine gegebene horizontale Auffangfläche mit der Schräge des Regeneinfalls ab, wodurch bei Wind die mit dem Pluviographen gemessene Regenmenge kleiner ausfällt als die von der Frigorimeterkugel aufgenommene. Bei größeren Regenintensitäten wird der Verdampfungsquotient h kleiner als 1, da dann ein Teil des gefallenen Regens abtropft und wegspritzt und deshalb keine Verdampfungswärme beansprucht.

Bei Niederschlag in Form von Schnee verläuft die Kurve etwas anders. Schon bei geringen Intensitäten wird die effektiv aufgewendete Wärmeenergie kleiner als die berechnete, somit auch der Verdampfungsquotient kleiner als 1. Es erklärt sich dies dadurch, daß die Schneeflocken wegen ihrer Leichtigkeit von den Strömungslinien um die Kugel herum etwas beeinflußt und abgelenkt werden; auch mag schon der Wärmekonvektionsstrom über dem Frigorimeter dazu beitragen, die Flocken am Auftreffen auf die Kugel zu verhindern.

Die klimatologischen Mittel der AG werden im allgemeinen mit Einbezug der Niederschlagszeiten über sämtliche Stundenwerte gerechnet. Wollte man jedoch genauer nur die Bedingungen erfassen, denen der Mensch, der sich in geeigneter Weise vor Niederschlag schützen kann, ausgesetzt ist, so müßten an den Stundenmitteln der AG im Falle von Niederschlag die aus Abb. 3a und 3b ersichtlichen Korrekturen E in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität angebracht werden.

3. Formel zur Berechnung der Abkühlungsgröße.

Nachdem nun alle Glieder der Gleichung (6)

$$A = S - (I + H) + L + V$$

im einzelnen besprochen und abgeklärt sind, lassen sie sich zu einer

Formel zusammenfassen, die unter gewissen Voraussetzungen eine Berechnung der AG ermöglicht. Es wird dann

$$A = 1,102_4 \cdot 10^{-9} (9,176 \cdot 10^9 - T^4) - 0,2 \left(\frac{I'}{\sin h} + 2 H' \right) + (6b) \\ + (0,145 + 0,117 v) (309,5 - T) + V (M', T).$$

Diese Formel (6b) gilt streng genommen nur für die Bedingungen, unter denen ihre einzelnen Komponenten abgeleitet worden sind; wie weit eine Extrapolation oder eine Übertragung auf andere Bedingungen mit der Einhaltung enger Fehlergrenzen vereinbar ist, bedürfte noch der Abklärung im einzelnen Fall. So ist das erste Glied auf der rechten Seite der Gleichung, das die Ausstrahlung des Frigorimeters berücksichtigt, in dieser Form nur dann streng gültig, wenn die Umgebung der Kugel angenähert von einheitlicher Temperatur T ist, also für den Fall einer tiefen geschlossenen Wolkendecke.

Der dritte Summand der Formel (6b) gilt streng nur für Windgeschwindigkeit ≤ 5 m/sec, da sich die Wärmeübergangszahl α_L aus unserem Material nicht über diese Grenze hinaus bestimmen läßt. Den Betrag von V als Funktion der stündlichen Niederschlagsmenge M kann man den Kurven E der Abb. 3 entnehmen.

Aus der Formel (6b) kann man erkennen, daß eine strenge Berechnung der AG aus ihren einzelnen Komponenten, wie sie schon von anderer Seite vorgeschlagen worden ist, auf große Schwierigkeiten stoßen muß, weil dafür Stundenwerte von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge, sowie Stundenmittelwerte der Sonnenhöhe und getrennt die Vertikalkomponenten der Einstrahlung von Sonne und Himmel bekannt sein müßten.

III. Der Tagesgang der Abkühlungsgröße.

1. Der mittlere Tagesgang der Abkühlungsgröße.

Zunächst ist der Tagesgang der AG für sämtliche Monate im Mittel über alle Wetterlagen zusammengestellt worden. Da der mittlere Tagesgang in dieser ersten Zusammenstellung noch immer etwas unregelmäßig verläuft, wurden die Stundenwerte nach der Formel $a + \frac{2b \pm c}{4}$ ausgeglichen und in dieser Form in Tab. I wiedergegeben.

Selbst diese über alle Situationen gemittelten Stundenwerte lassen erkennen, wie im wesentlichen der Tagesgang der AG ein Abbild der komplexen Wirkungen des Tagesganges von Temperatur, Strahlung und Wind darstellt. Da diese drei Faktoren unter sich natürlicherweise verknüpft sind, trägt der Tagesgang der AG dennoch ein einheitliches Gepräge: das Minimum liegt in den Morgen-, das Maximum meist in den Abendstunden, während in der Nacht die AG recht konstant auf einem mittleren Wert bleibt; einzig im tiefen Winter kann auch am frühen Morgen ein zweites Maximum auftreten.

Tabelle 1. *Abkühlungsgröße:*
Monatsmittel der Stundenwerte,

Monat	Tagesstunde														
	0	— 1	— 2	— 3	— 4	— 5	— 6	— 7	— 8	— 9	— 10	— 11	— 12	— 13	— 14
Januar...	16,9	17,1	17,2	17,3	17,4	17,3	17,3	17,5	16,9	16,4	14,0	13,1	13,4	14,4	
Februar...	16,6	16,4	16,3	16,3	16,2	16,4	16,8	16,6	15,8	14,5	13,3	13,1	14,0	15,2	
März	14,6	14,8	14,8	14,7	14,7	14,6	14,3	13,4	12,2	11,1	10,9	11,6	12,5	13,5	
April	14,6	14,6	14,6	14,5	14,5	14,0	12,7	11,4	10,8	10,9	11,5	12,3	12,9	13,2	
Mai.....	12,9	12,9	12,9	13,0	12,6	12,2	11,1	10,3	9,9	10,0	10,3	10,7	11,0	11,1	
Juni.....	11,6	11,6	11,6	11,5	11,3	10,4	9,5	9,0	9,0	9,3	9,6	9,8	10,1	10,5	
Juli	10,6	10,5	10,4	10,4	10,3	9,5	8,3	7,5	7,3	7,6	8,1	8,6	8,4	8,8	
August...	10,6	10,9	11,0	10,9	10,9	10,6	9,5	8,1	7,2	7,1	7,7	8,1	8,2	8,5	
Sept.	12,2	12,1	11,9	11,7	11,7	11,7	11,3	9,9	8,9	8,5	8,9	9,6	10,2	10,7	
Oktober .	13,1	13,2	13,3	13,4	13,4	13,3	13,2	12,7	11,5	10,0	10,0	10,6	11,7	12,5	
Nov.....	14,9	14,8	14,8	14,8	14,8	14,7	14,9	14,8	14,2	13,0	11,9	11,8	12,7	13,4	
Dez.....	15,9	15,9	16,0	16,2	16,4	16,5	16,6	16,6	16,4	14,9	13,4	12,8	13,0	13,7	
Dez.-März	16,0	16,1	16,1	16,1	16,2	16,2	16,2	15,8	15,3	14,2	12,9	12,7	13,2	14,2	
Apr.-Mai .	13,8	13,8	13,8	13,8	13,6	13,1	11,9	10,9	10,4	10,5	10,9	11,5	12,0	12,2	
Juni-Sept.	11,3	11,3	11,0	11,1	11,1	10,6	9,7	8,6	8,1	8,1	8,6	9,0	9,2	9,6	
Okt.-Nov.	14,0	14,0	14,1	14,1	14,1	14,0	14,1	13,8	12,9	11,5	11,0	11,2	12,2	13,0	

Die Einzelheiten dieses Tagesganges können dem in seiner Wirkung jeweils vorherrschenden meteorologischen Faktor zugeschrieben werden. So fällt die Abnahme der AG am Morgen mit dem Einsetzen der Einstrahlung und dem Ansteigen der Temperatur zusammen. Wenige Stunden darnach beginnt aber auch die Luftbewegung sich zu verstärken. Das Einsetzen des Tageswindes hemmt zunächst die weitere Abnahme der AG und bewirkt schließlich trotz anhaltenden Temperaturanstiegs und weiterer Verstärkung der Einstrahlung eine je nach Jahreszeit schwächere oder kräftigere Zunahme der AG in den späten Vormittags- und in den Nachmittagsstunden. Somit fällt das Minimum nicht etwa in die Zeit der höchsten Temperatur oder der stärksten Einstrahlung sondern auf den Zeitpunkt vor dem Einsetzen des periodischen Tageswindes, wobei die Wirkung ganz geringer Windgeschwindigkeiten zunächst noch durch die Zunahme von Temperatur und Einstrahlung aufgehoben wird. Bezeichnend ist daher auch die Verschiebung des Tagesminimums mit den Veränderungen des Zeitpunktes des Sonnenaufganges, da eben auch das Einsetzen des Tageswindes jahreszeitlichen Variationen unterworfen ist. Es läßt sich aus Tabelle 1 eindeutig erkennen, daß der Abfall der AG vom nächtlichen Konstantwert bis zum Vormittagsminimum in allen Monaten 3 bis 4 Stunden dauert, daß somit die Zwischenzeit zwischen Sonnenaufgang und dem mittleren Einsetzen des Tageswindes von der Jahreszeit unabhängig ist.

Der mittägliche Anstieg der AG hält so lange an, als die Luftbewegung der dominierende Faktor bleibt. In den späteren Nachmittagsstunden wirken die Abnahme von Temperatur und Strahlung ebenfalls im gleichen Sinn,

Davos, 4 Jahre.

ausgeglichen nach der Formel $\frac{a + 2b + c}{4}$.

Tagesstunde											Mittel	Tagesampl. (nicht ausgeglichen)	Monatsmittel der extremen Stundenwerte	
14—	15—	16—	17—	18—	19—	20—	21—	22—	23—	24 ^b			Min.	Max.
15,6	16,1	17,2	17,2	16,9	16,6	16,6	16,6	16,5	16,6	16,3	4,5	10,2	22,4	
16,2	16,9	17,4	17,5	17,0	16,7	16,8	17,0	17,1	16,9	16,1	4,9	10,0	23,5	
14,3	14,8	15,4	16,2	16,2	15,7	15,3	14,9	14,7	14,6	14,1	5,9	7,9	20,0	
13,6	14,4	14,9	15,8	16,2	15,8	15,1	14,6	14,6	14,6	13,7	5,8	7,6	20,2	
11,6	12,5	13,4	14,1	14,6	14,7	14,5	13,9	13,3	13,0	12,4	5,1	6,4	20,0	
11,0	11,4	11,9	12,5	13,2	13,5	13,3	12,9	12,3	11,8	11,2	4,9	5,3	19,8	
9,0	9,2	10,0	11,3	11,6	11,7	11,7	11,4	10,8	10,5	9,7	4,7	4,1	17,7	
8,9	9,6	10,2	11,2	11,8	11,7	11,3	11,0	10,7	10,5	9,8	4,9	4,6	17,4	
11,5	11,8	12,4	12,7	12,7	12,4	12,1	12,0	12,3	12,3	11,3	4,5	5,8	18,7	
12,9	13,7	14,4	14,4	13,9	13,7	13,6	13,4	13,3	13,2	12,9	5,1	7,3	18,3	
14,5	15,5	15,8	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,0	14,9	14,5	4,4	8,8	20,7	
14,6	15,5	16,2	16,2	16,0	15,8	15,8	15,9	15,9	15,9	15,4	4,0	9,9	21,2	
15,2	15,8	17,1	16,8	16,5	16,2	16,1	16,1	16,1	16,0					
12,6	13,5	14,2	15,0	15,4	15,3	14,8	14,4	14,0	13,8					
10,1	10,5	11,1	11,9	12,3	12,3	12,6	11,8	11,8	11,3					
13,7	14,6	15,1	15,1	14,7	14,6	14,4	14,3	14,4	14,1					

so daß es gegen Abend zu einem Maximum der AG kommt. Da die tagsüber entstandene Luftbewegung auch nach Beendigung der Einstrahlung noch einige Zeit anhält, so tritt dieses Abendmaximum der AG während des ganzen Jahres etwa eine Stunde nach Sonnenuntergang ein. Die Luftunruhe legt sich erst in den frühen Nachtstunden, wenn der Einfluß der Einstrahlung ausbleibt und somit die Wärmekonvektion wieder zurückgegangen ist. Mit der Abnahme des Windes ist auch ein leichter Rückgang der AG verbunden, bis zu einem bestimmten Wert, der hauptsächlich durch Lufttemperatur und Ausstrahlung gegeben ist und der dann bis in die Morgenstunden ziemlich konstant beibehalten wird.

In gewissen Monaten zeigt sich gegenüber diesem allgemeinen Verhalten eine leichte Abweichung, indem im tiefen Winter neben dem sekundären Maximum der AG am Abend das Hauptmaximum auf die frühen Vormittagsstunden (7 bis 8 Uhr) fällt. Die Ursache dieses allerdings sehr schwach ausgebildeten Maximums der AG in den letzten Nachtstunden muß die im Winter sehr große nächtliche Ausstrahlung sein, die mit Anwachsen der Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung zunimmt.

Der höchste Stundenwert der AG im mittleren Tagesgang wird mit $17,5 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ im Januar zwischen 7 und 8 Uhr und im Februar zwischen 17 und 18 Uhr erreicht, der tiefste mit 7,1 im August zwischen 9 und 10 Uhr. Die mittlere monatliche Tagesamplitude ist gemäß Tabelle 1 sowohl für die ausgeglichenen wie auch für die unausgeglichenen Monatsmittelwerte während des ganzen Jahres wenig variabel und relativ gering. Auch der Jahresgang der AG ist, verglichen mit demjenigen anderer Stationen, sehr ausgeglichen

und beträgt zwischen den Monatsmitteln von Januar und Juli nur $6,6 \text{ mecal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$.

Den Mittelwerten der AG in Tab. I ist noch eine weitere, auffällige Tatsache zu entnehmen: die Monatsmittel wie auch der Tagesgang der AG je zweier Monate, die symmetrisch zu Juli-August bzw. Januar-Februar liegen, stimmen weitgehend miteinander überein. Dadurch erscheint die übliche Zusammenfassung je dreier Monate zu einer Jahreszeit für den Fall der AG nicht sinnvoll; denn mit gleichem Recht, wie man den Juni noch zum Sommer rechnet, kann man auch den September miteinbeziehen, weist er doch im allgemeinen die gleichen Absolutwerte der AG auf wie der Juni. Auch Mai und Oktober, April und November sowie Januar und Februar durchlaufen in ihrem Tagesgang jeweils ungefähr die gleichen Werte. Einzig zwischen März und Dezember bestehen in der ersten Tageshälfte beträchtliche Unterschiede; jedoch verschwinden sie am Nachmittag und Abend wieder, so daß der gesamte Unterschied nicht sehr groß ist.

Auf Grund dieser Tatsachen ist es vorzuziehen, für eine klimatologische Untersuchung der AG von der in der Klimatologie gebräuchlichen Jahreszeiteinteilung abzugehen und dem Sinn entsprechend folgende Monate zusammenzufassen:

Dez.-Jan.-Feb.-März	= Winter
April-Mai	= Frühling
Juni-Juli-Aug.-Sept.	= Sommer
Okt.-Nov.	= Herbst.

Diese Zusammenfassung, durch die die Hauptjahreszeiten lang, die Übergangszeiten kurz gehalten werden, läßt sich noch durch weitere Überlegungen rechtfertigen. So spricht der für das Davoser Klima wichtige Faktor der Schneedecke für dieselbe Jahreszeiteinteilung, indem auf diese Weise die Hauptjahreszeiten mit eindeutigem Bestehen bzw. Fehlen einer Schneedecke zusammengefaßt und von den Übergangsjahreszeiten mit unsicherer Schneebedeckung abgetrennt werden.

Eine weitere Rechtfertigung für die hier benützte Zusammenfassung liefert der Jahresverlauf der AG als solcher. Die in der Klimatologie sonst gebräuchliche Einteilung der Jahreszeiten basiert zur Hauptsache auf dem Jahresgang der Temperatur und liegt symmetrisch zu dessen Extremen. Bei der AG jedoch handelt es sich um einen Komplexbegriff, der von mehreren klimatischen Einflüssen und nicht nur dem der Temperatur abhängt. So kommt das Minimum der AG in die Monate Juli-August zu liegen; denn mit dem Maximum der Einstrahlung im Juni und dem der Temperatur im Juli fällt ein solches der Windgeschwindigkeit zusammen. Es wird also nicht in diesen beiden Monaten das Minimum der AG erreicht, indem dieses wegen der Abnahme der Windgeschwindigkeit gegen den August hin verschoben ist. Entsprechend liegen die Verhältnisse im Winter, indem die Zunahme der Windgeschwindigkeit im Februar und März die Andauer der hohen Abkühlungswerte über den Januar hinaus verlängert.

In Abb. 4 sind die nach der hier begründeten Einteilung zusammengefaßten Jahreszeitenmittel der AG wiedergegeben. Trotz der Mittelung sind die wesentlichen Tatsachen darin noch gut zu erkennen: die Verschiebung des Minimums als Funktion des Sonnenaufgangs und die Verschiebung des Maximums mit der Dauer des Tageswindes, sodann die Konstanz des Verlaufs in der Nacht mit der Tendenz zu einem sekundären Maximum während der frühen Morgenstunden.

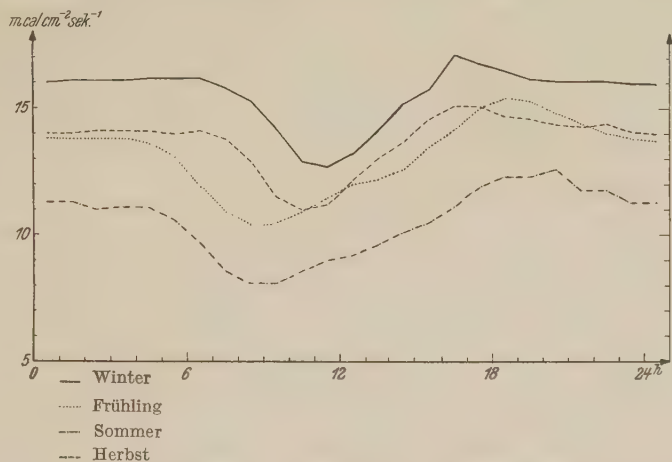


Abb. 4. Jahreszeitenmittel des Tagesganges der Abkühlungsgröße in Davos.

Der Vollständigkeit halber sei beigelegt, daß an Vergleichsmaterial zu den von uns untersuchten Tagesgängen der AG lediglich von Helsingfors (H. LUNELUND [5]) eine einjährige Beobachtungsreihe vorliegt, die jedoch ein wesentlich anderes Verhalten zeigt.

2. Der Tagesgang der Abkühlungsgröße in Abhängigkeit von der Witterung.

a) Auswahl der Tage einheitlicher Witterung.

Man wird mit Recht erwarten, daß die Abhängigkeit des Tagesganges der AG von den einzelnen meteorologischen Faktoren sich noch deutlicher erkennen läßt, wenn dem Vergleich nur eine Mittelbildung über Wetterlagen zugrunde gelegt wird, die unter sich gleichartig sind. Zu diesem Zweck sind aus der vierjährigen Periode, über welche sich unser Registriermaterial erstreckt, Tage von bestimmtem, einheitlichem Wittertypus ausgesucht worden. Diese Auswahl wurde an Hand der vielseitigen Beobachtungen und Registrierungen am Observatorium Davos für die folgenden vier typischen Situationen getroffen:

1. Strahlungstage;
2. bedeckte Tage, ohne Niederschlag;
3. Tage mit vorwiegend hoher Bewölkung (Cirrentage);
4. Tage mit mittlerer Bewölkungsmenge respektive mit gebrochener Bewölkung.

Die Bestimmung der Wolkendecke geschah auf Grund der meist fünfmal täglich durchgeführten Wolkenbeobachtungen (um 8, 10, 12, 15 und 18 Uhr). Die Sonnenscheindauer wurde mit dem Sonnenscheinchronographen Maurer festgestellt. An dieser Stelle¹ wird die AG nur für folgende zwei Witterungstypen genauer erörtert:

1. *Strahlungstage* sind Tage, an denen die relative Sonnenscheindauer in jeder Stunde wenigstens fünf Sechstel der Stunde beträgt und bei keiner Wolkenbeobachtung nennenswerte Bewölkung aufgezeichnet worden ist.

2. *An bedeckten Tagen* darf die Sonne während keiner Stunde mehr als 10 Minuten geschienen haben. Andererseits muß aus den Pluviographauswertungen ersichtlich sein, daß kein nennenswerter Niederschlag gefallen ist.

Für die Strahlungs- und die bedeckten Tage wurde nun der Tagesgang der AG zusammengestellt und getrennt für jeden Monat gemittelt; die Zahl der verwendeten Tage ist in Tabelle 2 und 3 unter *n* angegeben.

b) Der Tagesgang der Abkühlungsgröße an Strahlungstagen.

Die Strahlungstage dürfen vom geophysikalischen und bioklimatischen Standpunkt aus als die wichtigste und interessanteste Gruppe ausgesuchter Tage bezeichnet werden. Von vorneherein wird man erwarten, daß bei dieser Wetterlage, an der sowohl der Tagesgang der Einstrahlung als auch der des Windes und der Temperatur ungestört zur Ausbildung kommen können, die Beziehungen zwischen der AG und diesen drei meteorologischen Faktoren besonders deutlich hervortreten werden. Aus diesem Grunde sei den Betrachtungen nicht die allgemeine Übersicht über den Tagesgang der AG an Strahlungstagen vorangestellt, sondern der aus einzelnen Beispielen besonders deutlich hervortretende Zusammenhang zwischen den einzelnen Elementen und der AG. Aus jeder Jahreszeit ist ein mittlerer monatlicher Tagesgang herausgegriffen, der dieses Zusammenspiel gut erkennen läßt. So sind in Abb. 5 für die Monate Februar, April, Juli und Oktober die mittleren Tagesgänge der AG, der Windgeschwindigkeit und der Temperatur an Strahlungstagen eingetragen. Für die Temperatur ist die Skala in umgekehrter Richtung gewählt, damit der die AG bedingende Faktor auch in gleichem Sinn in Erscheinung tritt. Mit Pfeilen ist die Zeit des mittleren monatlichen Sonnenauf- und -unterganges markiert.

Jede kleinste Variation der AG kann in dieser Darstellung unmittelbar auf eine solche eines der anderen Elemente zurückgeführt werden. Besonders auffallend sind die Einflüsse relativ geringer Schwankungen der Windgeschwindigkeit während der Nachtstunden, die schon merkbare Änderungen der AG hervorzurufen vermögen. Als Folge der ungleich lang dauernden täglichen Einstrahlung im Laufe des Jahres erkennt man im Tagesgang der AG insofern eine Veränderung, als sich im Sommer in den späten Nachmittagsstunden wegen des Temperaturanstieges über den Zeitpunkt der größten Windgeschwindigkeit hinaus ein sekundäres Minimum auszubilden vermag, welches in den Übergangsmonaten nur schwach angedeutet, im Winter jedoch ganz unterdrückt ist. Andererseits

¹ Vgl. Anm. S. 88.

bewirken die langen Winternächte den starken Ausstrahlungseffekt, der eine Betonung des Morgenmaximums der AG hervorruft.

Während für den Tagesgang der Mittelwerte der AG über sämtliche Tage in allen Monaten eine Zeitdifferenz von ungefähr 3 bis 4 Stunden

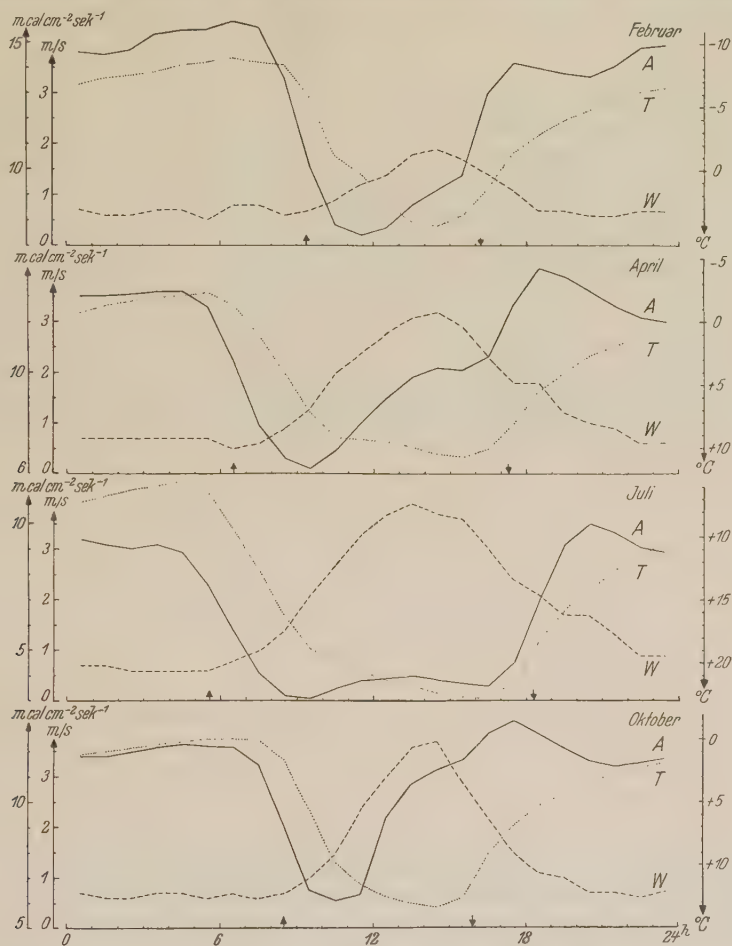


Abb. 5. Mittlerer monatlicher Tagesgang der Abkühlungsgröße A , der Windgeschwindigkeit W und der Temperatur T an Strahlungstagen (ausgesuchte Monate).

zwischen dem Zeitpunkt des Sonnenaufgangs und dem Eintreten des Vormittagsminimums festgestellt werden konnte, weist diese Zeitspanne an den Strahlungstagen einen Jahresgang auf. Im Winter tritt das Minimum der AG ca. 2, im Frühling und Herbst 3 und im Sommer sogar 4 Stunden später als der Sonnenaufgang ein.

In Tab. 2 sind die ausgeglichenen mittleren Tagesgänge, die Tagesmittel, Amplituden und Extreme für die Strahlungstage sämtlicher

Tabelle 2. Abkühlungsgröße:

Monatsmittel der Stundenwerte an Strahlungstagen,

Monat	n	Tagesstunde													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13—14
Jan.	25	16,6	16,6	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,3	15,5	13,8	11,3	9,5	9,3	10,3
Febr.	6	14,6	14,5	14,7	15,3	15,5	15,5	15,8	15,6	13,6	10,1	7,8	7,4	7,7	8,6
März	21	13,5	13,6	13,6	13,7	13,8	13,7	13,4	12,1	9,6	7,5	6,9	7,8	9,3	10,5
April	11	13,0	13,0	13,1	13,2	13,2	12,6	10,5	7,9	6,6	6,2	6,9	8,0	9,0	9,8
Mai	9	12,2	12,4	12,3	12,1	11,6	10,4	9,0	7,7	7,0	7,9	9,3	9,7	9,0	8,2
Juni	8	10,5	10,5	10,5	10,4	9,7	7,9	6,0	4,6	3,6	3,2	3,5	3,8	3,7	3,9
Juli	11	9,4	9,2	9,0	9,2	8,9	7,6	5,7	4,1	3,2	3,1	3,5	3,8	3,9	4,0
Aug.	8	8,5	8,7	8,8	8,8	8,8	8,0	6,1	4,3	2,8	2,5	2,7	3,0	2,7	2,3
Sept.	15	11,0	10,9	10,8	10,9	11,1	11,1	10,4	8,7	7,1	6,6	7,2	8,6	9,8	10,5
Okt.	14	11,8	11,8	12,0	12,2	12,3	12,2	12,2	11,5	9,1	6,5	6,1	6,4	9,4	10,7
Nov.	20	13,6	13,8	14,2	14,3	14,1	14,0	13,9	13,8	12,9	10,7	8,3	7,7	8,3	9,2
Dez.	13	15,6	15,7	15,8	15,8	15,9	16,0	16,0	16,1	15,6	13,9	11,4	9,7	9,5	10,1
Dez. bis März		15,1	15,1	15,2	15,3	15,4	15,4	15,4	15,0	13,6	11,3	9,4	8,6	9,0	9,9
Apr. bis Mai		12,6	12,7	12,7	12,7	12,4	11,5	9,8	7,8	6,8	7,1	8,1	8,9	9,0	9,0
Juni bis Sept.		9,9	9,8	9,8	9,8	9,6	8,7	7,1	5,4	4,2	3,9	4,2	4,8	5,0	5,2
Okt. bis Nov.		12,7	12,8	13,1	13,3	13,2	13,1	13,1	12,7	11,5	8,6	7,2	7,1	8,9	9,9

Monate sowie ihre Jahreszeitenmittel zusammengestellt; mit n ist die Zahl der für die Mittelbildung verwendeten Tage angegeben.

Bei den Jahreszeitenmitteln erkennt man, daß das Morgen- und Hauptminimum im Frühjahr etwas früher eintritt als im Sommer, weil bei der hier benützten Zusammenfassung der Monate zu Jahreszeiten April und Mai zum Frühling, Juni-September zum Sommer gehören, so daß der mittlere Sonnenaufgang des Frühjahrs früher stattfindet als der des Sommers. Die Kurven für Frühling und Sommer verlaufen auffallend parallel miteinander mit einer Differenz von 2 bis 4 $\text{mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, während anderseits Herbst und Winter im Ablauf zwar recht ähnlich sind, jedoch nicht durchwegs eine gleichmäßige Differenz zeigen. Während der Nachtstunden mit ihren geringen Variationen der AG liegen die Kurven der Absolutbeträge so zueinander, wie auf Grund

Davos, 4 Jahre.

ausgeglichen nach der Formel $\frac{a + 2b + c}{4}$.

Tagesstunde											Mittel	Tagesampl. (unausgeglichen)	Monatsmittel der extremen Stundenwerte	
14 — 15 — 16 — 17 — 18 — 19 — 20 — 21 — 22 — 23 — 24 ^h	Min.	Max.												
11,7 13,3 14,6 15,2 15,3 15,3 15,3 15,3 15,4 15,6	14,5	8,2	7,8	19,0										
9,2 9,8 13,0 14,2 14,0 13,8 13,7 14,1 14,8 14,9	12,9	9,1	6,5	17,2										
10,9 11,3 12,4 14,4 15,1 14,3 13,8 13,5 13,5 13,5	12,1	9,2	5,9	16,5										
10,2 10,1 10,6 12,7 14,1 13,8 13,2 12,6 12,2 12,0	12,0	9,1	5,1	15,6										
7,6 7,8 7,9 9,3 11,9 13,5 13,4 12,7 12,0 11,7	9,8	7,4	5,3	14,5										
4,2 3,8 5,1 6,5 9,4 11,2 11,2 10,8 10,4 10,5	7,4	8,6	2,1	12,5										
3,8 3,7 3,6 4,5 7,0 9,2 10,0 9,7 9,1 8,9	6,4	7,5	1,7	11,2										
2,3 3,0 3,9 5,5 7,9 9,0 9,0 8,9 8,7 8,6	6,0	7,0	1,2	9,7										
10,8 10,7 11,0 11,9 12,3 11,8 11,0 10,7 10,9 11,0	10,3	6,2	5,2	14,0										
11,3 11,7 12,7 13,2 12,8 12,2 11,7 11,5 11,6 11,8	11,1	8,0	5,0	14,8										
10,5 12,3 13,5 13,7 13,5 13,5 13,5 13,5 13,4 13,3	12,4	7,0	6,4	15,9										
10,9 12,3 14,1 14,8 14,6 14,8 15,2 15,2 15,0 14,9	14,2	7,2	8,1	18,1										
10,7 11,7 13,5 14,7 14,8 14,6 14,5 14,5 14,7 14,7														
8,9 9,0 9,3 11,0 13,0 13,7 13,3 12,7 12,1 11,9														
5,3 5,3 5,9 7,1 9,2 10,3 10,3 10,0 9,8 9,8														
10,9 12,0 13,1 13,5 13,2 12,9 12,6 12,5 12,5 12,6														

der Temperaturunterschiede zu erwarten ist: die größte Abkühlung im Winter, die kleinste im Sommer, Herbst und Frühling dazwischen, wobei der Herbst um wenigstens höher liegt als der Frühling. Der Windeinfluß ist dagegen die Ursache dafür, daß sich die Kurven in ihrem Verlauf gelegentlich überschneiden. Es wirkt sich die Luftbewegung im Frühling so stark aus, daß über Mittag die Abkühlung größere Werte annimmt als in den entsprechenden Stunden im Herbst und Winter. Auch das Maximum der Abendstunden liegt im Frühling außerordentlich hoch. Dasselbe gilt für die Nachmittagsstunden im Herbst, die größere Abkühlung aufweisen als dieselben Stunden in den Wintermonaten.

Wie sich die Zeitpunkte der Minima und Maxima der AG an Strahlungstagen als Folge der variablen Dauer der Einstrahlung von Monat zu Monat verschieben, läßt sich ebenfalls aus Tabelle 2 ersehen. Der höchste Stunden-

wert des Monatsmittels wird im Januar in den frühen Morgenstunden erreicht ($16,6 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ zwischen 2 und 3 Uhr), der tiefste im zweiten, nachmittäglichen Minimum des August ($2,3 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ zwischen 13 und 15 Uhr). Die Mittel der Tagesmaxima an Strahlungstagen fallen in fast allen Monaten um 1 bis $2 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ größer aus als die Maximalwerte des mittleren Tagesganges an Strahlungstagen. Die Mittel der Tagesminima sind im allgemeinen um denselben Betrag tiefer als die niedrigsten Stundenmittel des monatlichen Tagesganges.

Bei einer so ins Einzelne gehenden Diskussion über Mittelwerte aus teilweise sehr wenig zahlreichem Material mag die Frage auftauchen, inwieweit die Resultate wirklich als repräsentativ aufgefaßt werden dürfen und ob nicht weiteren, bei der Auswahl der Tage noch nicht berücksichtigten Faktoren ein entscheidender Einfluß zugeschrieben werden muß. Wie zu erwarten, zeigt sich bei genauer Durchsicht, daß durch den Windeinfluß beträchtliche Abweichungen vom mittleren Tagesgang auftreten können. Wie sich aus dem Zusammenspiel der meteorologischen Faktoren verstehen läßt, verursacht eine Änderung der Windgeschwindigkeit nicht nur eine Parallelverschiebung der Kurve nach größeren oder kleineren Beträgen, sondern sie gibt der AG einen etwas anderen Verlauf. Größere Windgeschwindigkeiten machen sich einerseits durch den früheren Wiederanstieg der AG nach dem Morgenminimum bemerkbar, halten andererseits länger an und verursachen gegenüber geringer Windgeschwindigkeit ein höheres Maximum der AG in den Abendstunden. An Tagen geringer Windgeschwindigkeit fällt das Minimum der AG ziemlich genau auf die Zeit der stärksten Einstrahlung, also fast genau auf den Mittag, während an windreichen Strahlungstagen im Sommer wie im Winter das Minimum 1 bis 3 Stunden früher eintritt. Man findet sogar, daß der Einfluß des Windes auf die AG im Extremfall derart stark sein kann, daß selbst im Sommer während der Mittagsstunden an Strahlungstagen größere Werte der Abkühlung erreicht werden können als an windstillen Strahlungstagen im Winter. Diese Tatsache zeigt deutlich, daß die für einheitliche Witterung bestimmten Tagesgänge tatsächlich nur ein mittleres Maß für die AG darstellen, von denen im Einzelfall beträchtliche Abweichungen auftreten können.

Bei unserer eingehenden Untersuchung der Cirrentage¹ wurde festgestellt, daß die AG an Tagen mit vorwiegender Cirrenbewölkung ganz ähnlich, häufig sogar noch etwas geringer ist als an Strahlungstagen; denn an Cirrentagen sind Luftbewegung und Ausstrahlung meistens kleiner als an wolkenlosen Tagen, wodurch die Verminderung der Einstrahlung häufig überkompensiert wird.

c) Der Tagesgang der Abkühlungsgröße an bedeckten Tagen.

Für die Tage mit vollständig bedecktem Himmel, die einen Gegensatz zu den Strahlungstagen bilden, sind in Tab. 3 die mittleren Tagesgänge der AG in Monats- und Jahreszeitenmitteln zusammengestellt; da für die Sommermonate meist nur Halbtage zur Verfügung stehen, fehlen hier die Tagesmittel und Extremwerte. Auch an bedeckten Tagen besitzt die AG einen ausgesprochenen Tagesgang, der ebenfalls durch ein Vormittagsminimum und ein starkes Abendmaximum charakterisiert

¹ Vgl. Anm. S. 88.

ist. Doch tritt an bedeckten Tagen das Morgenminimum um 1 bis 2 Stunden, das Abendmaximum sogar um 2 bis 4 Stunden früher ein als an Strahlungstagen. Dabei ist allerdings der Abfall der AG von den Nachtwerten bis zum Morgenminimum sehr viel kleiner als an

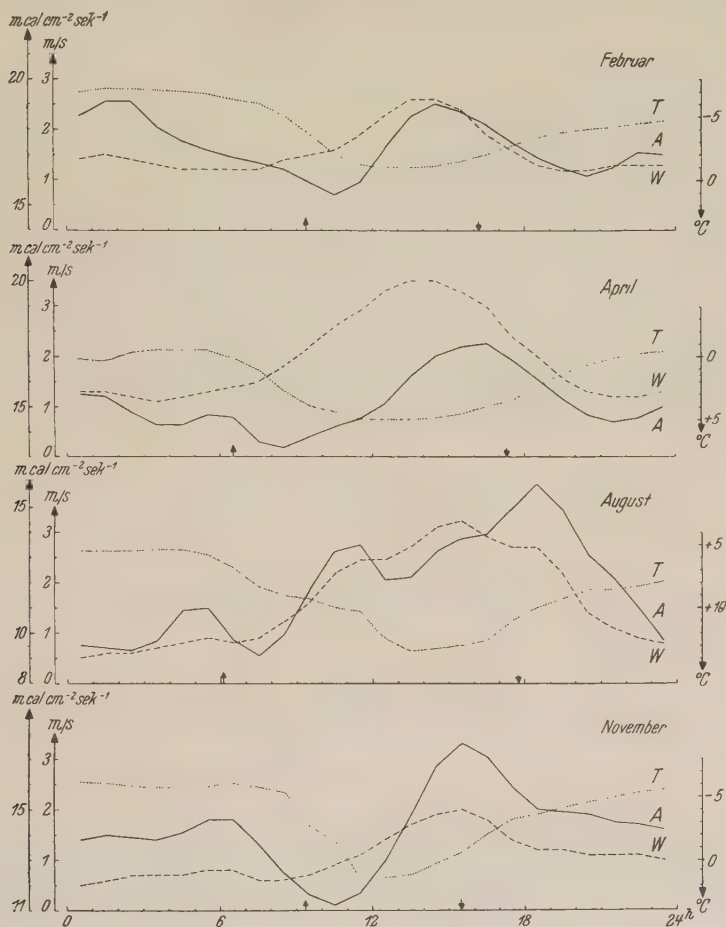


Abb. 6. Mittlerer monatlicher Tagesgang der Abkühlungsgröße A , der Windgeschwindigkeit W und der Temperatur T an bedeckten Tagen (ausgesuchte Monate).

Strahlungstagen, wie auch der Anstieg am Nachmittag an bedeckten Tagen nur etwa halb so groß ist als an Strahlungstagen.

An bedeckten Tagen liegen die Werte der AG der Tagesstunden im allgemeinen höher als die der Nachtstunden, während an Strahlungstagen das Umgekehrte der Fall ist. Dieser Verlauf des Tagesganges der AG an bedeckten Tagen erklärt sich dadurch, daß einerseits die direkte Einstrahlung und damit ein ausgeprägter Temperaturanstieg am

Tabelle 3. *Abkühlungsgröße:*

Monatsmittel der Stundenwerte an bedeckten Tagen,

Monat	n	Tagesstunde														
		0	— 1	— 2	— 3	— 4	— 5	— 6	— 7	— 8	— 9	— 10	— 11	— 12	— 13	— 14
Jan.	6	17,9	17,5	17,7	18,1	18,1	18,1	18,0	18,1	18,8	20,2	20,1	20,0	20,6	22,1	
Febr.	5	18,5	19,1	19,1	18,1	17,5	17,2	16,9	16,7	16,4	15,9	15,4	15,9	17,3	18,5	
März	7	17,1	17,3	16,7	16,0	16,2	16,6	16,8	16,8	16,0	15,4	16,1	17,5	18,6	19,4	
April	5	15,5	15,4	14,8	14,3	14,3	14,7	14,6	13,6	13,4	13,8	14,2	14,5	15,1	16,2	
Mai	6	11,4	11,3	11,2	11,2	11,1	10,6	10,3	10,5	10,8	11,4	13,0	13,7	12,8	12,4	
Juni	4	10,0	10,2	10,6	10,6	10,1	9,5	9,0	9,1	10,5	12,1	12,5	12,9	14,1	15,4	
Juli	3	9,8	9,6	9,0	9,0	9,0	8,2	7,6	7,4	7,7	8,0	8,1	8,3	12,9	13,6	
Aug.	5	9,5	9,4	9,3	9,7	10,9	11,0	9,7	9,1	9,9	11,7	13,2	13,5	12,1	12,2	
Sept.	5	11,3	11,4	11,3	11,0	10,8	10,8	10,8	10,8	11,1	11,6	12,2	12,8	12,8	12,2	
Okt.	4	15,5	15,3	15,2	14,9	14,5	14,4	14,3	13,5	12,7	12,6	12,4	12,6	14,1	15,3	
Nov.	5	13,8	14,0	13,9	13,8	14,1	14,6	14,6	13,6	12,5	11,6	11,2	11,7	13,0	14,8	
Dez.	14	15,9	16,4	16,7	16,6	16,2	16,1	15,9	15,6	14,9	13,8	13,5	14,0	14,7	15,3	
Dez. bis																
März		17,4	17,6	17,6	17,2	17,0	17,0	16,9	16,8	16,5	16,3	16,3	16,9	17,8	18,8	
April bis																
Mai		13,5	13,4	13,0	12,8	12,7	12,7	12,5	12,1	12,1	12,6	13,6	14,1	14,0	14,3	
Juni bis																
Sept.		10,2	10,3	10,2	10,1	9,9	9,5	9,0	8,8	9,3	10,1	10,5	10,9	12,7	13,8	
Okt. bis																
Nov.		14,7	14,7	14,6	14,4	14,3	14,5	14,5	13,6	12,6	12,1	11,8	12,2	13,6	15,1	

Vormittag fehlen, während anderseits in den Mittagsstunden eine Verstärkung der Luftbewegung nicht ausbleibt. Im Winterhalbjahr zeigt sich gegen Mitternacht eine leichte Zunahme der AG, welche von einer vorübergehenden Verstärkung der nächtlichen Luftbewegung herrührt. Obwohl die Geschwindigkeit des nächtlichen Hangabwindes meist nur um wenige Zehntel m/sec variiert, kann eine Änderung der AG von einigen Zehntel $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ hervorgerufen werden. Bemerkenswert am Tagesgang der AG im Winter sind die niedrigen Werte in bedeckten Nächten, indem sogar das Minimum in den späten Abendstunden niedriger ausfällt als das des Vormittags.

Verglichen mit den Strahlungstagen weisen die bedeckten Tage durchwegs höhere Werte der AG auf, doch betragen die Differenzen während der Nachtstunden durchschnittlich nur 1 bis 2 $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$, in den Tagesstunden dagegen bedeutend mehr.

Davos, 4 Jahre.

ausgeglichen nach der Formel $\frac{a + 2b + c}{4}$.

Tagesstunde											Mittel	Tagesampl. (unausgeglichen)	Monatsmittel der extremen Stundenwerte	
14 — 15 — 16 — 17 — 18 — 19 — 20 — 21 — 22 — 23 — 24 ^h	Min.	Max.												
24,1 24,8 23,6 21,4 21,5 18,1 17,3 17,4 17,6 17,8	19,4	8,7	14,1	27,1										
19,0 18,7 18,2 17,5 16,9 16,5 16,2 16,5 17,1 17,0	17,4	4,3	13,3	22,8										
18,9 17,7 17,2 17,3 17,0 16,1 15,5 15,5 15,4 15,3	16,7	4,9	11,3	23,3										
17,0 17,4 17,5 16,9 16,1 15,3 14,7 14,4 14,6 15,0	15,1	5,2	10,7	20,2										
13,0 13,4 13,5 13,4 13,1 12,8 12,9 12,9 12,5 12,4	—	—	—	—										
16,0 16,1 16,0 16,2 16,6 16,0 14,7 14,1 13,6 12,8	—	—	—	—										
14,5 14,5 13,4 12,7 12,5 11,6 11,0 11,0 10,7 10,3	—	—	—	—										
13,2 13,7 13,9 14,9 15,9 14,9 13,1 12,2 11,0 9,7	—	—	—	—										
12,0 12,5 12,8 12,9 13,0 12,3 12,1 12,5 12,5 12,2	—	—	—	—										
15,6 16,2 16,7 16,0 15,0 14,9 14,8 13,8 13,2 13,3	14,4	5,3	8,5	20,1										
16,7 17,6 17,1 15,9 15,0 14,9 14,8 14,5 14,4 14,2	14,2	7,5	9,5	20,4										
15,9 16,3 16,5 16,7 16,4 15,8 15,6 15,6 15,2 14,7	15,6	3,8	10,9	21,4										
19,5 19,4 18,9 18,2 18,0 16,6 16,2 16,3 16,3 16,2														
15,0 15,4 15,5 15,2 14,6 14,0 13,8 13,7 13,6 13,7														
14,1 14,4 14,0 13,9 13,7 12,8 12,1 12,2 11,9 11,4														
16,2 16,9 16,9 16,0 15,0 14,9 14,8 14,2 13,8 13,8														

Ein Vergleich der Monatsmittel der AG an bedeckten Tagen mit dem Durchschnitt aller Tage läßt erkennen, daß an bedeckten Tagen, wie zu erwarten, die AG größer ist als im klimatologischen Durchschnitt; einzig im November und Dezember verschwindet dieser Unterschied.

In Abb. 6 sind die mittleren monatlichen Tagesgänge von AG, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur für vier Monate mit bemerkenswertem Verhalten der AG zusammengestellt, wobei wie in Abb. 5 die Lufttemperatur in umgekehrtem Sinn aufgetragen wurde. Da für den August nur ein einziger Tag zur Verfügung stand, wurde nicht nur die AG, sondern auch die Windgeschwindigkeit ausgeglichen.

Auffallend starke Anstiege der AG fallen entweder mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit oder aber mit Sinken der Temperatur und Aussetzen der Einstrahlung bei gleichzeitigem Fortbestehen einer kräftigen Luftbewegung zusammen; umgekehrt erklären sich Abnahmen der

AG durch Abflauen der Windgeschwindigkeit oder Temperaturanstieg. Wenn auch an bedeckten Tagen die Einstrahlung nur geschwächt und diffus ist, hängt dennoch von ihrer Andauer eine solche der verstärkten Windgeschwindigkeit ab, wodurch immer wieder maximale Werte der AG in den Sommermonaten während einer viel längeren Zeitspanne erreicht werden können als im Winter.

Da die Himmelsbedeckung allein zur Charakterisierung der Witterung nicht ausreicht, wurden auch für die bedeckten Tage Fälle von besonders großer bzw. kleiner Windgeschwindigkeit herausgesucht und ihr Tagesgang der AG mit dem mittleren Verlauf aller bedeckten Tage verglichen. Auch hier zeigt sich, daß im Einzelfall große Abweichungen vom Mittel eintreten können, und zwar vor allem in den Tagesstunden. Im übrigen sind die Verhältnisse an bedeckten Tagen ziemlich unregelmäßig, so daß den Unterschieden im einzelnen kein sehr großes Gewicht beigemessen werden darf.

Für die Resultate der beiden vorangegangenen Abschnitte über den mittleren Tagesgang der AG an Strahlungstagen und an bedeckten Tagen existieren in der Literatur keine umfassenden Vergleichswerte. Einzig die Untersuchung von R. FAUST ([6], S. 53) an einer Freilandstation bei Leipzig enthält etwas Vergleichsmaterial, auf das jedoch hier nicht eingegangen wird.

3. Die Abkühlungsgröße während des Krankentages.

Unter den Gesichtspunkten der medizinischen und Kurortklimatologie ist es von Interesse, die Abkühlungsverhältnisse speziell während des sogenannten Krankentages (= KT) genauer zu untersuchen. Man bezeichnet damit die Zeit, während der sich der Patient normalerweise sollte im Freien aufhalten können. Praktisch ist die Länge des Krankentages im Laufe des Jahres variabel, da sie im wesentlichen eine Funktion der Lufttemperatur und der Andauer des Sonnenscheins ist. Genaue Definitionen über die Dauer des KT bestehen keine, weshalb für die vorliegende Untersuchung ein sinngemäßes Schema aufgestellt wurde, wie es sich aus der Erfahrung ergibt. Dieses lautet, nach vollen Stunden auf- bzw. abgerundet, folgendermassen:

Monate	Dauer des Krankentages
Dezember bis Februar	9 bis 17 Uhr
März bis Mai	8 „ 18 „
Juni bis August	7 „ 19 „
September bis November.....	8 „ 18 „

Da sich an unseren Stundenwerten der AG eine derartige, nach Jahreszeiten abgestufte Behandlung der AG an KT gut durchführen läßt, sollen diese Fragen hier noch gesondert untersucht werden.

a) Monatsmittel der Abkühlungsgröße während des Krankentages.

In den Monatsmitteln und deren Jahresgang bestehen zwischen den 24stündigen Mitteln und denen, die nur über die Stunden des KT ge-

bildet sind (Tab. 4), keine sehr großen Unterschiede. In Davos ist in allen Monaten das Mittel der AG während des KT um ungefähr $1 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ kleiner als ihr 24stündiges Mittel; dieser kleine Unterschied erklärt sich daraus, daß nicht nur das Minimum sondern auch das Maximum innerhalb des KT liegen, während sich in der Nacht die Werte in mittleren Beträgen bewegen.

Tabelle 4. Monatsmittel der Abkühlungsgröße über 24 Stunden und über den Krankentag im klimatologischen Mittel und an ausgesuchten Tagen.

	klimatol. Mittel			Strahlungstage			bedeckte Tage		
	24std. Mittel	Mittel d. KT	Δ	24std. Mittel	Mittel d. KT	Δ	24std. Mittel	Mittel d. KT	Δ
Januar	16,3	15,1	1,2	14,5	11,6	2,9	19,4	22,0	— 2,6
Februar	16,1	15,0	1,1	12,9	9,1	3,8	17,4	17,6	— 0,2
März	14,1	13,2	0,9	12,1	10,0	2,1	16,7	17,2	— 0,5
April	13,7	12,8	0,9	12,0	9,0	3,0	15,1	15,6	— 0,5
Mai	12,4	11,4	1,0	9,8	8,2	1,6	—	—	—
Juni	11,2	10,5	0,7	7,4	4,7	2,7	—	—	—
Juli	9,7	8,7	1,0	6,4	3,9	2,5	—	—	—
August	9,8	8,8	1,0	6,0	3,5	2,5	—	—	—
September	11,3	10,5	0,8	10,3	9,3	1,0	—	—	—
Oktober	12,9	12,1	0,8	11,1	9,8	1,3	14,4	14,4	0,0
November	14,5	13,8	0,7	12,4	10,7	1,7	14,2	14,2	0,0
Dezember	15,4	14,2	1,2	14,2	11,6	2,6	15,6	14,9	0,7

An Tagen mit eindeutiger Wetterlage zeigen dagegen die Abkühlungsverhältnisse in den über die beiden Zeitintervalle gewonnenen Mittelwerten nicht eine so gute Übereinstimmung. An Strahlungstagen sind vor allem im Winter die Differenzen zwischen dem 24stündigen und dem Krankentagmittel wesentlich größer als im Durchschnitt aller Tage. Soweit man auch die bedeckten Tage in diesen Vergleich einbeziehen kann, nämlich für die Übergangs- und Wintermonate, kann man die Feststellung machen, daß an solchen Tagen die mittlere AG des KT meist größer oder gleich der des 24stündigen Mittels ist.

Da sich die Differenzen zwischen dem 24stündigen und dem Mittel über den KT eindeutig aus dem Tagesgang erklären lassen, muß an Stationen mit vollkommen anderem Tagesgang der AG auch ein anderes Verhältnis zwischen den beiden Mittelwerten bestehen. Beispiele dafür bieten die Untersuchungen von Basel und Locarno (BIDER und THAMS [19]).

b) Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte der Abkühlungsgröße während des Krankentages.

Schließlich wurde auch die Häufigkeitsverteilung der Stundenmittel der AG während des KT untersucht und in Tab. 5 in Intervallen von von 5 zu $5 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ in Prozenten für die Monate, die Jahreszeiten und das Jahr wiedergegeben; die Stufe 0,0 wurde gesondert betrachtet

und damit die Häufigkeit der Fälle untersucht, in denen während der Dauer einer Stunde keine Aufheizung der Frigorimeterkugel, also auch keine Abkühlung unter $36,5^{\circ}$ erfolgte. Einteilung der Jahreszeiten und Dauer des KT richten sich nach den oben gegebenen Definitionen (S. 104 und S. 114). Die Jahreszeitenresultate sind außerdem im Blockdiagramm Abb. 7 wiedergegeben.

Tabelle 5. *Häufigkeit der einzelnen Stufen der Abkühlungsgröße im Stundenmittel während des Krankentages in Prozenten.*

	0,0	0,1 bis 5,0	5,1 bis 10,0	10,1 bis 15,0	15,1 bis 20,0	20,1 bis 25,0	25,1 bis 30,0	30,1 bis 35,0	35,1 bis 40,0	>40,0
Januar			22	38	23	7	6	3	1	
Februar		2	22	31	23	15	6	1	0	0
März		4	29	36	20	8	2	1	0	0
April		5	34	29	18	10	3	1	0	0
Mai	0	15	32	27	16	6	3	1	0	0
Juni	1	20	30	25	17	5	1	1	0	0
Juli	2	26	37	21	10	2	1	1	0	0
August	3	27	35	23	9	2	1	0	0	0
September		17	35	30	13	3	1	0	1	0
Oktober		6	34	35	15	8	2	0	0	
November		2	24	40	19	10	4	1	0	
Dezember		1	23	41	19	11	4	1		
Winter		2	24	36	21	10	5	2	0	0
Frühling		10	33	28	17	8	3	1	0	0
Sommer	2	22	34	25	12	3	1	1	0	0
Herbst		4	29	37	17	9	3	1	0	
Jahr	1	9	30	31	18	7	3	1	0	0

In diesen Resultaten fällt vor allem auf, daß die Blockdiagramme für die vier Jahreszeiten ein weitgehend ähnliches Aussehen haben. Im Frühling und Sommer fällt die größte Häufung auf die Stufe 5 bis 10, im Herbst und Winter auf die Stufe 10 bis 15 $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$. Höhere Werte der AG können in Davos in allen Jahreszeiten vorkommen, auch im Sommer, sehr niedrige dagegen ausschließlich im Sommer; infolgedessen ist das Blockdiagramm im Sommer etwas breiter als in den andern Jahreszeiten.

Im Durchschnitt fallen in Davos je rund $\frac{1}{3}$ der Stunden auf die Stufen 5 bis 10 und 10 bis 15 $\text{mcal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$; bemerkenswerterweise sind dies gerade die Intervalle der AG, die man nach der Einteilung von W. MÖRIKOFER [3] gefühlsmäßig als angenehm bezeichnen kann. Kleinere AG als 5 empfindet man als heiß, solche, die größer als 15 sind, als kalt.

Obgleich es sich hier um die Klassifikation von Stundenwerten handelt, während bei der Untersuchung von MÖRIKOFER Mittel über ganze Tageszeiten zugrunde liegen, kann diese Einteilung zweifellos doch Anwendung

finden, da die Empfindung, ganz besonders für angenehme Stufen der AG, nicht von deren Dauer abhängen kann. Es ergibt sich somit, daß nach dieser Klassifikation 61% der Stunden des KT in Davos eine angenehme AG haben, während nur 10% als heiß, 29% als kalt zu bezeichnen sind. Bemerkenswert ist, daß in allen Jahreszeiten die Zahl der angenehmen Stunden rund 60%, die der nicht angenehmen rund 40% beträgt. Nur verschiebt sich das Schwergewicht der letzteren im Winter gegen die Werte erhöhter, im Sommer gegen niedrige Abkühlungsgrößen.

Für einen Vergleich der Häufigkeitsverteilung der AG von Davos mit den Verhältnissen an anderen Orten steht nur wenig Material zur Verfügung (vgl. BIDER und THAMS [19]) und zudem ist es nicht streng vergleichbar, da es in Davos auf Stundenmitteln, an den anderen Stationen auf 24stündigen Mitteln beruht. Obschon aus diesem Grunde für die Vergleichsstationen mit einer größeren Häufigkeit ausgeglichener, mittlerer Werte gerechnet werden muß, zeigen die Resultate von Locarno eine gesteigerte Häufigkeit vor allem für die Stufen kleiner AG, woran sich die große Häufigkeit abkühlungsarmer Zeiten in Locarno erkennen läßt. In Basel und Zürich verschieben sich im Laufe des Jahres die Maxima der Häufigkeit ganz deutlich, indem im Winter kalte bis sehr kalte Tage dominieren, während im Sommer in der Niederung durchwegs angenehme bis unangenehm warme Tage die Mehrzahl bilden und in Locarno ihr Maximum erreichen. Davos geht aus diesem Vergleich eindeutig als die begünstigste der Vergleichsstationen hervor, da hier während des ganzen Jahres vorwiegend Werte der AG aufgezeichnet werden, die gemäßigt sind, keine großen Ansprüche an das Wärmeregulationsvermögen stellen und von unserem Gefühl als angenehm empfunden werden.

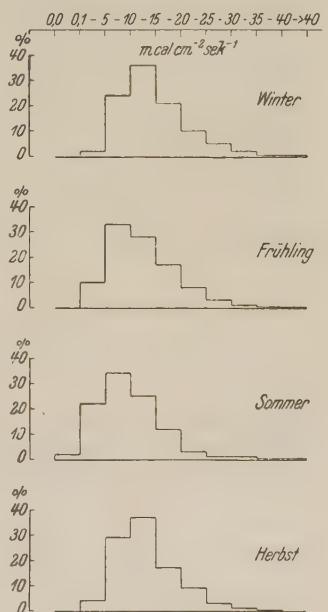


Abb. 7. Häufigkeitsprozente der Abkühlungsgröße während des Krankentages im Jahreszeitenmittel in Davos.

IV. Zusammenfassung.

1. Am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos sind während vier voller Jahre zwischen 1941 und 1946 Registrierungen der Stundenwerte der Abkühlungsgröße (= AG) durchgeführt worden. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, auf Grund der Resultate dieser Registrierungen einerseits den Einfluß der einzelnen meteorologischen Elemente auf die AG zu analysieren, anderseits den Tagesgang der AG

vom klimatologischen und bioklimatologischen Standpunkt aus zu diskutieren.

2. Die Vorrichtung zur Aufzeichnung der stündlichen Mittelwerte der AG durch die Kombination eines Frigorimeters mit einem registrierenden Wattstundenzähler wird beschrieben; außerdem wird angegeben, wie die Werte der zum Vergleich herangezogenen weiteren Elemente bestimmt worden sind.

3. Die einzelnen Faktoren, die zur AG beitragen, werden diskutiert und ihre Auswirkung auf die AG wird formelmäßig wiedergegeben. Soweit die Koeffizienten dieser Formeln nicht schon aus der Theorie hergeleitet werden können, werden sie aus den Resultaten der Registrierung der AG bestimmt und in einer Gesamtformel zusammengefaßt.

4. Die Abhängigkeit der AG pro Grad Übertemperatur θ der Frigorimeterkugel über Lufttemperatur von der Windgeschwindigkeit läßt sich nach Eliminierung der Strahlungsglieder wiedergeben durch die Formel

$$\frac{A}{\theta} = 0,145 + 0,117 v.$$

5. Der Einfluß von Regen und Schneefall auf die AG wird graphisch dargestellt.

6. Der mittlere monatliche Tagesgang der AG ist vor allem bestimmt durch das Zusammenspiel der Tagesgänge von Wind, Temperatur und Strahlung und weist daher ein Minimum in den Vormittagsstunden, ein Maximum in den Abendstunden auf. Die Tagesamplitude ist im Laufe des Jahres sehr wenig veränderlich. Die Besonderheiten des Jahresverlaufs der AG in Davos sprechen für eine andere als die in der Klimatologie gebräuchliche Jahreszeiteinteilung, welche trotz ungleicher Länge der Jahreszeiten als sinngemäß erachtet und für diese Untersuchung verwendet wird.

7. Der mittlere monatliche Tagesgang der AG über einheitliche, unter sich gleiche Witterungstypen (Strahlungstage und Tage mit bedecktem Himmel) wird besprochen. An ausgesuchten mittleren Tagesgängen sind die Zusammenhänge zwischen der AG und den übrigen meteorologischen Elementen besonders deutlich ersichtlich. Dem Verlauf der AG an Strahlungstagen mit dem ausgeprägten Minimum am Vormittag, dem Maximum in den Nachmittagsstunden und den gleichmäßigen hohen Werten in der Nacht einerseits steht anderseits der Tagesgang an bedeckten Tagen mit nur wenig ausgesprochenem Minimum am Vormittag und sehr ausgeprägtem Maximum in den frühen Abendstunden bei relativ niedrigen mittleren Beträgen in der Nacht gegenüber.

8. Im Zusammenhang mit der Erörterung der AG während der Tagesstunden (Krankentag) wird auch die Häufigkeitsverteilung bestimmter Stufen der AG behandelt, aus der ein sehr ausgeglichenes Abkühlungsklima von Davos hervorgeht.

Literaturverzeichnis.

1. THILENIUS, R. und C. DORNO: Das Davoser Frigorimeter (ein Instrument zur Dauerregistrierung der physiologischen Abkühlungsgröße). Meteorol. Z. **42**, 57 (1925).
2. THILENIUS, R.: Die Konstruktion des Davoser Frigorimeters. Meteorol. Z. **48**, 254 (1931).
3. MÖRIKOFER, W.: Zur Klimatologie der Abkühlungsgröße. Acta Davosiana **1**, Nr. 3 (1933).
4. GOLDSCHMIDT, H.: Eine einfache Registriervorrichtung für das Davoser Frigorimeter. Meteorol. Z. **48**, 435 (1931).
5. LUNELUND, H.: Registrierung der Abkühlungsgröße in Helsingfors. Soc. Sci. Fenn., Comm. Phys.-Math. **VI**, 1 (1931); Strahlentherap. **45**, 147 (1932).
6. FAUST, R.: Das Abkühlungsklima im Walde und auf freiem Felde nach Frigorimeterregistrierungen. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig, II. Serie **8**, 1 (1936).
7. LETTAU, H.: Zur selbsttätigen Aufzeichnung der klimatischen Abkühlungsgröße mittels des Davoser Frigorimeters. Z. Instrumentenkunde **57**, 333 (1937).
8. — Ein neues Registriergerät für das Davoser Frigorimeter. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig, II. Serie, **10**, 131 (1938).
9. LEHMANN, H.: Mikroklimatische Untersuchungen der Abkühlungsgröße in einem Waldgebiet. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig, II. Serie, **7**, 180 (1936).
10. KESTERMANN, A.: Abkühlungsstudien mit besonderer Berücksichtigung des Frigorigraphen nach Büttner und Pfeleiderer. Biokl. Beibl. **7**, 1 (1940).
11. LINKE, F.: Die Übertemperatur einer frei aufgestellten schwarzen Kugel. Meteorol. Z. **43**, 11 (1926).
12. NUSSELT, W.: Das Grundgesetz des Wärmeüberganges. Gesundheitsing. **38**, 477, 490 (1915).
13. BÜTTNER, K.: Die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion, Verdunstung und Strahlung in Bioklimatologie und Meteorologie. Abh. Preuß. Met. Inst. **10**, Nr. 5 (1934).
14. DORNO, C.: Die Abkühlungsgröße in verschiedenen Klimaten nach Dauerregistrierungen mittels des „Davoser Frigorimeters“. Meteorol. Z. **45**, 401 (1928).
15. BIDER, M.: Ergebnisse der Beobachtungen mit dem Davoser Frigorimeter in Basel. Strahlentherap. **39**, 541 (1931).
16. KOHLRAUSCH-KRÜGER: Kleiner Leitfaden der praktischen Physik. Teubner, Leipzig und Berlin, 1932, S. 449.
17. PFELEIDERER, H. und K. BÜTTNER: „Bioklimatologie“ im Lehrbuch der Bäder- und Klimaheilkunde, herausgegeben von H. VOGT, Verlag Springer, Berlin 1940, S. 765.
18. LAHMEYER, F.: Die Abkühlungsgröße Assuans nach Dauerregistrierungen mittels des Davoser Frigorimeters. Meteorol. Z. **47**, 27 (1930).
19. BIDER, M. und Chr. THAMS: Messungen der Abkühlungsgröße nord- und südwärts der Alpen. Ann. Schw. Met. Z. A. **1945**, Anh. 6 (1946).
20. WIERZEJEWSKI, H.: Theoretisches und Konstruktives zur Messung der Abkühlungsgröße. Arch. Met. Geoph. Biokl. B **2**, 65 (1950).

